

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des Sciences Appliquées
Département de génie civil

**ÉTUDE SUR LES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE POUR
L'INSTRUMENTATION DE STRUCTURES DE GÉNIE CIVIL**

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées
Spécialité: génie civil

Jean-François NICOLE

Sherbrooke (Québec), Canada

Septembre 2000



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitons et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-86676-9

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-86676-9

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

REMERCIEMENTS

Je désire exprimer ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué de près ou de loin et ce, chacune à leur manière, à la réalisation de ce travail.

Je souhaite adresser des remerciements particuliers aux personnes et organismes suivants:

- mon directeur, M. Brahim Benmokrane pour ses conseils, son expérience et la grande latitude dont j'ai pu bénéficier;
- Roctest Ltée par l'entremise de messieurs Pierre Choquet et François Juneau pour le soutien technique qu'ils m'ont apporté;
- FISO Technologies inc., notamment M. Claude Belleville pour sa participation importante et ses commentaires du côté optique;
- Pultrall inc. et Industrial Composites pour les expérimentations en industrie;
- ISIS Canada pour les soutiens financier et technique;
- notre équipe de recherche, notamment M. Mohamed Chekired et M. Claude Dugal pour le temps passé ensemble au laboratoire et sur le pont pendant lequel nos échanges étaient toujours des plus instructifs et intéressants;
- mes parents, Monique et J-C, pour leurs encouragements et leur support dans la poursuite de mes objectifs; et finalement
- Isabelle, qui m'a motivé et soutenu en maintes occasions et ainsi permis de me rendre jusqu'au bout.

RÉSUMÉ

Les capteurs à fibre optique, récemment introduits sur le marché, constituent une nouvelle alternative pour l'instrumentation d'ouvrages de génie civil et en particulier pour l'instrumentation des structures armées avec des éléments en polymères renforcés de fibres (PRF). L'utilisation de ces nouveaux instruments permet de mesurer les paramètres habituellement évalués avec les instruments conventionnels, mais offre en plus la possibilité de réaliser de nouvelles applications en raison de la géométrie et des caractéristiques particulières de ces capteurs.

La présente étude porte donc sur l'évaluation de capteurs à fibre optique pour l'instrumentation d'ouvrages de génie civil et spécialement sur les structures comportant des éléments en PRF.

Des essais thermiques, mécaniques et cycliques ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons d'acier, de PRF et de béton afin d'évaluer le comportement des capteurs à fibre optique lorsqu'ils sont employés avec ces matériaux.

Une expérimentation sur l'intégration de capteurs à fibre optique dans des barres d'armature de PRF a été réalisée en industrie lors du procédé de fabrication de ces éléments.

L'étude s'est terminée avec l'instrumentation et le suivi d'une structure de pont où une partie de l'armature est composée d'un treillis en PRFC. Plusieurs instruments de mesure dont les capteurs à fibre optique ont été utilisés pour l'instrumentation de l'armature, du tablier et des poutres maîtresses.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

dB: Décibel

F.O.: Fibre optique

J.E.: Jauge électrique

MEB: microscope électronique à balayage

n: Indice de réfraction

PRF: Polymères renforcés de fibres

PRFA: Polymères renforcés de fibres d'aramide

PRFC: Polymères renforcés de fibres de carbone

PRFV: Polymères renforcés de fibres de verre

PVC: Polychlorure de vinyle

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. INTRODUCTION	1
1.1 Généralités	1
1.2 État de la question	2
1.3 Thème de la recherche	3
1.4 Organisation du mémoire	4
2. NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA FIBRE OPTIQUE AINSI QUE SUR LES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE	6
2.1 Mise en situation	6
2.2 Développement de la fibre optique	7
2.3 Propriétés et caractéristiques des fibres optiques	10
2.3.1 Composition et gaines protectrices	10
2.3.2 Dimensions	10
2.3.3 Phénomène d'atténuation	11
2.3.4 Résistance mécanique	12
2.3.5 Températures	12
2.3.6 Durabilité	13
2.4 Capteurs à fibre optique	14
2.4.1 Paramètres mesurés	15
2.4.2 Modes ou principes généraux de fonctionnement	16
2.4.3 Caractéristiques et particularités	17
2.5 Capteurs à fibre optique extrinsèques Fabry-Pérot utilisés dans le cadre de ce programme de recherche	18
3. CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE EN GÉNIE CIVIL: ESSAIS ET APPLICATIONS	24
3.1 Revue d'essais en laboratoire sur les capteurs à fibre optique	25
3.2 Intégration dans des armatures en polymères renforcés de fibres (PRF)	30
3.2.1 Procédé de fabrication des PRF	31
3.2.2 Tentative d'intégration de capteurs à fibre optique de type SFO	33
3.2.3 Gainés mécaniques protectrices	38
3.3 Instrumentation de structures au moyen des capteurs à fibre optique	46
3.3.1 Stork Bridge en Suisse	47
3.3.2 Taylor Bridge au Manitoba, Canada	49
3.3.3 Sunsang Bridge en Corée	52
3.3.4 Salmon River Bridge en Nouvelle-Écosse, Canada	55
3.4 Lien entre les essais et les applications en génie civil et le programme expérimental	63
4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	64
4.1 Essais de laboratoire	64
4.1.1 Objectifs	64
4.1.2 Manipulations et collage des capteurs à fibre optique	65
4.1.3 Essais thermiques	67

	Page
4.1.4 Essais mécaniques	69
4.1.5 Dalle armée avec un treillis en PRFC Nefmac C19	71
4.2 Intégration en industrie dans des barres d'armature en PRFV	73
4.2.1 Objectif	73
4.2.2 Démarche expérimentale	73
4.3 Intégration en industrie dans un treillis d'armature en PRFC	75
4.3.1 Objectif	75
4.3.2 Détail du procédé de fabrication des treillis Nefmac	75
4.4 Instrumentation du pont Joffre à Sherbrooke	80
4.4.1 Description du projet	81
4.4.2 Installation des jauges électriques et à fibre optique sur le treillis en PRFC en laboratoire	83
4.4.3 Installation des différents capteurs sur les poutres maîtresses en acier	84
4.4.4 Autres capteurs installés directement en chantier	87
 5. PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	 88
5.1 Essais de laboratoire	88
5.1.1 Essais thermiques	88
5.1.2 Essais mécaniques	94
5.1.2.1 <i>Barres d'armature lisses en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV)</i>	94
5.1.2.2 <i>Barres d'armature crénelées en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV)</i>	99
5.1.2.3 <i>Barres d'armature crénelées en acier</i>	104
5.1.2.4 <i>Échantillons provenant d'un treillis en PRFC Nefmac</i>	108
5.1.2.5 <i>Cylindre de béton</i>	110
5.2 Dalle armée avec un treillis en PRFC Nefmac C19	112
5.2.1 Mûrissement du béton	112
5.2.2 Essais cycliques	114
5.2.3 Essais comparatifs	119
5.3 Intégration en industrie dans des barres d'armature en PRFV	122
5.3.1 Première expérimentation	122
5.3.2 Deuxième expérimentation	127
5.3.3 Troisième expérimentation	129
5.3.4 Quatrième expérimentation	132
5.4 Intégration en industrie dans un treillis d'armature en PRFC	134
5.4.1 Préparation des capteurs à fibre optique SFO et intégration	134
5.4.2 Connexion des capteurs à fibre optique en laboratoire	137
5.5 Pont Joffre	140
5.5.1 Capteurs à fibre optique SFO collés sur les treillis Nefmac C19	141
5.5.2 Capteurs à fibre optique SFO intégrés dans les treillis Nefmac C19	143
5.5.3 Jauges électriques collées sur les treillis Nefmac C19	144
5.5.4 Capteurs à fibre optique SFO-W soudés sur la poutre d'acier centrale	145
5.5.5 Jauges électriques soudées sur les poutres d'acier du pont Joffre	146
5.5.6 Capteurs à corde vibrante SM-2W soudés sur la poutre centrale d'acier	148

	Page
5.5.7 Capteurs à fibre optique enfouis dans le béton du tablier	149
5.5.8 Blocs de jauges électriques enfouis dans le béton du tablier	151
5.5.9 Capteurs à corde vibrante EM-5 enfouis dans le béton du tablier	152
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	154
Premier volet: essais de laboratoire	154
Deuxième volet: intégration de capteur SFO en industrie	156
Troisième volet: instrumentation du pont Joffre	157
Recommandations	158
BIBLIOGRAPHIE	161
ANNEXE A	
MÉTHODES DE COLLAGE DES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE	165
ANNEXE B	
LISTE DES INSTRUMENTS DE MESURE DU PONT JOFFRE	174
SCHÉMAS DE LOCALISATION ET PHOTOGRAPHIES DES INSTRUMENTS DE MESURE DU PONT JOFFRE	184
SUIVI DES CAPTEURS DU PONT JOFFRE	193

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1 Schéma illustrant le principe de propagation d'un faisceau optique à l'intérieur d'une fibre optique	7
Figure 2.2 Schéma illustrant un capteur à fibre optique de configuration courante	14
Figure 2.3 Schéma illustrant le principe de fonctionnement du capteur à fibre optique SFO	20
Figure 2.4 Schéma illustrant le traitement du signal optique à l'intérieur du poste de lecture	22
Figure 3.1 Comparaison entre un capteur à fibre optique et une jauge électrique	25
Figure 3.2a Comparaison entre un réseau de Bragg et une jauge électrique	26
Figure 3.2b Corrélation entre un réseau de Bragg et une jauge électrique	26
Figure 3.3 Comparaison entre un capteur à fibre optique de type réseau de Bragg et une jauge électrique collés sur les faces opposées d'un échantillon en aluminium	27
Figure 3.4 Comparaison entre un capteur à fibre optique extrinsèque Fabry-Pérot et une jauge électrique installés sur une barre d'armature d'acier	28
Figure 3.5 Comparaison entre des capteurs à fibre optique de longueurs différentes et des J.E.	30
Figure 3.6 Réponse d'un capteur SFO au procédé de pultrusion avec fibres mais sans résine et sans augmentation de température	34
Figure 3.7 Réponse d'un capteur SFO au procédé de pultrusion avec fibres et avec augmentation de température mais sans résine	35
Figure 3.8 Réponse d'un capteur SFO au procédé complet de pultrusion	36
Figure 3.9 Réponse du capteur SFO protégé lors de son intégration	38
Figure 3.10 Schéma du pendule de torsion	41
Figure 3.11 Schéma montrant le principe de l'essai d'enfoncement	41
Figure 3.12 Vue au MEB de fibres optiques A2 et A3 intégrées	43
Figure 3.13 Essais d'enfoncement réalisés sur les gaines a)P1, b)P2, c)A3 et d)A2	44
Figure 3.14 Déformations enregistrées avec les capteurs à fibre optique (BG1, BG4 et BG7) et avec une jauge électrique	48
Figure 3.15 Profils de déformations (BG1, BG4 et BG7) et de températures (BG5) enregistrés avec les capteurs à fibre optique	48
Figure 3.16 Schéma du Taylor Bridge présentant l'emplacement des capteurs à fibre optique	50
Figure 3.17 Déformations enregistrées par un capteur à fibre optique lors du passage d'un camion-remorque	51
Figure 3.18 Emplacement des capteurs à fibre optique sur l'armature des poutres pour les essais de flexion (a) et les essais de cisaillement (b)	53
Figure 3.19 Déformations enregistrées par les jauges électriques en fonction du nombre de franges enregistrées par un capteur à fibre optique	54
Figure 3.20 Profils de déformation enregistrés par un capteur à fibre optique lors du passage d'un camion à a) 30 km/h, b) 40 km/h, c) 50km/h, d) 60 km/h, e) 70 km/h et f) 80 km/h	55

	Page
Figure 3.21a	Schéma du système innovateur du Salmon River Bridge 56
Figure 3.21b	Système de courroies en acier placé sous le tablier du pont 56
Figure 3.22	Courroies d'acier instrumentées avec des capteurs à fibre optique et des jauges électriques 57
Figure 3.23	Essai de traction réalisé sur une courroie d'acier 58
Figure 3.24	Essai de compression réalisé sur une courroie d'acier 59
Figure 3.25	Chargement de rupture d'une courroie en acier 60
Figure 3.26	Résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique lors des tests de poinçonnement 61
Figure 3.27	Acquisition de données réalisée avec un capteur à fibre optique 62
Figure 4.1	Échantillons soumis aux essais thermiques 68
Figure 4.2	Barres d'armature en acier et en PRFV soumises aux essais de traction 69
Figure 4.3	Montage utilisé pour les essais de traction 70
Figure 4.4	Montage réalisé pour les essais de chargements cycliques 71
Figure 4.5	Schéma présentant la position des capteurs à fibre optique et des jauges électriques utilisés pour l'instrumentation de la dalle 72
Figure 4.6	Intégration d'un capteur SFO à l'entrée de la chambre de pultrusion 74
Figure 4.7	Équipements nécessaires à la fabrication d'un treillis Nefmac 76
Figure 4.8	Fabrication d'un treillis Nefmac en fibres de carbone 77
Figure 4.9	Première passe longitudinale 79
Figure 4.10	Première passe transversale 79
Figure 4.11	Vue aérienne de la reconstruction du pont Joffre 80
Figure 4.12	Schéma montrant l'emplacement des renforcements en PRF 81
Figure 4.13	Portée du pont Joffre dont une section de l'armature est du PRFC 82
Figure 4.14	Localisation des différents capteurs sur les poutres d'acier 85
Figure 4.15	De gauche à droite: capteur SFO-W, J.E. et capteur SM-2W 86
Figure 4.16	Capteurs enfouis dans le béton du tablier 87
Figure 5.1	Réponse du capteur SFO 100 0720 selon la variation de la température 88
Figure 5.2	Réponse du capteur SFO 100 1401 selon la variation de la température 89
Figure 5.3	Réponse du capteur EFO 100 3020 selon la variation de la température 89
Figure 5.4	Essais thermiques avec capteurs SFO collés sur éprouvettes de béton cylindriques 92
Figure 5.5	Essais thermiques avec un capteur SFO collé sur une barre d'armature de PRFV 92
Figure 5.6	Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1473 95
Figure 5.7	Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1218 95
Figure 5.8	Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1272 96
Figure 5.9	Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1236 et une J.E. 97
Figure 5.10	Essais de traction sur PRFV avec capteur SFO 100 1216 et J.E. 101
Figure 5.11	Essais de traction sur PRFV avec capteur SFO 100 1264 et J.E. 102
Figure 5.12	Essais de traction sur PRFV avec capteurs SFO 100 0720 et Bragg 00714 103
Figure 5.13	Essais de traction sur acier avec capteur SFO 100 1295 et J.E. 104
Figure 5.14	Essais de traction sur acier avec capteur SFO 100 1287 et J.E. 106
Figure 5.15	Essais de traction sur acier avec capteur Bragg 00720 107

	Page
Figure 5.16 Échantillons de treillis Nefmac soumis aux essais de traction	108
Figure 5.17 Essais de traction sur échantillons de treillis Nefmac avec capteur SFO 100 1382 et J.E.	109
Figure 5.18 Essais de traction sur échantillons de treillis Nefmac avec capteur SFO 100 1376 et J.E.	109
Figure 5.19 Essai de compression sur éprouvette de béton avec capteur SFO 100 0730	111
Figure 5.20 Mûrissement de la dalle de béton armée avec le treillis Nefmac C19	112
Figure 5.21 Chargements statiques appliqués avant les chargements cycliques	114
Figure 5.22 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 300 cycles de chargement	115
Figure 5.23 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 300 cycles de chargement	116
Figure 5.24 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 2M de cycles de chargement	116
Figure 5.25 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 2M de cycles de chargement	117
Figure 5.26 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 4M de cycles de chargement	117
Figure 5.27 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 4M de cycles de chargement	118
Figure 5.28 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 1837	119
Figure 5.29 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 1795	120
Figure 5.30 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 3002	120
Figure 5.31 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 2921	121
Figure 5.32 Section transversale d'un élément de PRFV avec un capteur à fibre optique SFO intégré (grossissement = 85X)	125
Figure 5.33 Interface entre le capteur à fibre optique SFO et le PRFV (grossissement = 500X)	125
Figure 5.34 Schéma illustrant le tube d'acier usiné et la ferrule placée à l'intérieur	135
Figure 5.35 Tube d'acier et fibre optique au moment de l'intégration	136
Figure 5.36 Intégration d'un capteur à fibre optique dans le treillis Nefmac C19	137
Figure 5.37 Tubes d'acier dégagés du PRFC	139
Figure 5.38 Vue rapprochée d'un capteur à fibre optique intégré dans le treillis Nefmac	139
Figure 5.39 Capteurs à fibre optique intégrés et opérationnels	140
Figure 5.40 Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS5	142
Figure 5.41 Capteurs à fibre optique intégrés dans les treillis Nefmac LS7 et LS8	143
Figure 5.42 Jauges électriques collées sur le treillis Nefmac LS6	145
Figure 5.43 Capteurs à fibre optique soudés sur la poutre d'acier centrale	146
Figure 5.44 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier centrale (C)	147
Figure 5.45 Capteurs à corde vibrante soudés sur la poutre centrale d'acier	148
Figure 5.46 Capteurs à fibre optique TFO-H enfouis dans le tablier de béton	150
Figure 5.47 Capteurs à fibre optique EFO enfouis dans le tablier de béton	150
Figure 5.48 Jauges électriques du bloc C	151
Figure 5.49 Capteurs à corde vibrante EM-5 enfouis dans le tablier de béton	153

		Page
Figure B.1	Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS5 et LS6	184
Figure B.2	Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS7 et LS8	185
Figure B.3	Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS9 et LS10	186
Figure B.4	Types et positions des instruments de mesure installés sur les poutres d'acier et blocs de jauges électriques noyées dans la dalle de béton	187
Figure B.5	Blocs de 4 jauges électriques noyées dans la dalle de béton	187
Figure B.6	Vue en plan et vue en élévation des blocs de jauges électriques	188
Figure B.7	Capteur de déformation à fibre optique SFO	189
Figure B.8	Échantillon témoin de treillis Nefmac C19 instrumenté d'un capteur SFO, d'un réseau de Bragg et d'une jauge électrique	189
Figure B.9	Capteur de température à fibre optique TFO-H	190
Figure B.10	Capteur de déformation à corde vibrante SM-2W	190
Figure B.11	Capteur de déformation à fibre optique EFO	191
Figure B.12	Capteur de déformation à corde vibrante EM-5	191
Figure B.13	Capteur de déformation à fibre optique réseau de Bragg	192
Figure B.14	Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS6	193
Figure B.15	Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS9	193
Figure B.16	Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS10	194
Figure B.17	Jauges électriques collées sur le treillis Nefmac LS5	194
Figure B.18	Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier A	195
Figure B.19	Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier B	195
Figure B.20	Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier D	196
Figure B.21	Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier E	196
Figure B.22	Jauges électriques du bloc A	197
Figure B.23	Jauges électriques du bloc BA	197
Figure B.24	Jauges électriques du bloc B	198
Figure B.25	Jauges électriques du bloc CB	198
Figure B.26	Jauges électriques du bloc DC	199
Figure B.27	Jauges électriques du bloc D	199
Figure B.28	Jauges électriques du bloc ED	200
Figure B.29	Jauges électriques du bloc E	200

LISTE DES TABLEAUX

	Page
TABLEAU 3.1 CARACTÉRISTIQUES DES GAINES MÉCANIQUES UTILISÉES LORS DE L'ÉTUDE DE NELLEN ET COLL., (1998)	42
TABLEAU 4.1 ESSAIS THERMIQUES	68
TABLEAU 4.2 ESSAIS MÉCANIQUES	70
TABLEAU 5.1 COEFFICIENTS D'EXPANSION THERMIQUES EXPÉRIMENTAUX	90
TABLEAU 5.2 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES TROIS BARRES D'ARMATURE LISSES EN PRFV INSTRUMENTÉES AVEC SEULEMENT UN CAPTEUR À FIBRE OPTIQUE SFO	94
TABLEAU 5.3 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA BARRE D'ARMATURE LISSE EN PRFV INSTRUMENTÉE AVEC UN CAPTEUR SFO (100 1236) ET UNE J.E.	98
TABLEAU 5.4 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES TROIS BARRES D'ARMATURE CRÉNELÉES EN PRFV	100
TABLEAU 5.5 RÉSULTATS OBTENUS AVEC TROIS BARRES D'ARMATURE CRÉNELÉES EN ACIER	105
TABLEAU 5.6 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES ÉCHANTILLONS PROVENANT DU TREILLIS D'ARMATURE EN PRFC DE TYPE NEFMAC	110
TABLEAU 5.7 CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE UTILISÉS LORS DE LA DEUXIÈME ÉTAPE DE L'INTÉGRATION	128
TABLEAU 5.8 CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES (SANS CAPTEUR) INTÉGRÉES LORS DE LA QUATRIÈME EXPÉRIMENTATION DE L'INTÉGRATION	132
TABLEAU B.1 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS5)	174
TABLEAU B.2 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS6)	175
TABLEAU B.3 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS7)	176
TABLEAU B.4 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS8)	177
TABLEAU B.5 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS9)	178
TABLEAU B.6 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS10)	179
TABLEAU B.7 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DES ÉCHANTILLONS DÉCOUPÉS DU TREILLIS NEFMAC C19	180
TABLEAU B.8 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DES POUTRES MÉTALLIQUES	181
TABLEAU B.9 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES NOYÉES DANS LA DALLE DE BÉTON	182

1. INTRODUCTION

1.1 Généralités

La dernière génération d'instruments de mesure à avoir fait son apparition dans le domaine du génie civil sont les capteurs à fibre optique. Leur introduction dans ce domaine, bien que récente, laisse entrevoir d'énormes possibilités d'applications, notamment en raison de l'émergence des matériaux composites ou polymères renforcés de fibres dans l'industrie de la construction. Le mariage de ces deux nouvelles technologies pour la fabrication d'éléments ou de structures dites intelligentes est maintenant une nouvelle réalité avec laquelle les gestionnaires, les ingénieurs et les constructeurs doivent composer.

Le présent projet de recherche consiste donc en l'évaluation d'un nouveau capteur à fibre optique de type Fabry-Pérot pour son utilisation dans le domaine des structures de génie civil. L'objectif principal de cette étude était, par le biais d'essais de laboratoire, d'expérimentation en industrie et d'instrumentation d'une structure réelle, de démontrer aux gestionnaires, ingénieurs et constructeurs le potentiel d'utilisation de ce type de capteur à fibre optique. De cette manière, ces différents intervenants disposeront dans un avenir rapproché de données qui permettront d'augmenter leur confiance dans cette nouvelle technologie et d'en faciliter le passage du laboratoire aux applications pratiques.

1.2 État de la question

La crise mondiale des infrastructures oblige les différents intervenants à chercher de nouveaux moyens de gestion et de nouvelles solutions pour vaincre les nombreux problèmes de dégradations des structures en béton armé auxquels ils sont confrontés. En effet, la grande majorité des infrastructures présentement en service est constituée d'éléments en béton armé qui datent de la période comprise entre la fin de la deuxième guerre mondiale et le début des années 70. Beaucoup de ces ouvrages arrivent donc à la fin de la vie utile pour laquelle ils avaient été conçus. L'augmentation du nombre de véhicules ainsi que du poids de ceux-ci et l'utilisation de sels déglçants ont aussi fortement contribué à devancer l'échéance fixée en accélérant les processus de dégradations de ces structures.

La situation précaire dans laquelle se retrouvent actuellement les propriétaires et les gestionnaires d'infrastructures a déclenché une intensification dans la recherche de meilleurs moyens de gestion de ces infrastructures. En parallèle à cette situation, l'intense développement dans le domaine des télécommunications qui est survenu au cours des vingt dernières années a résulté en la multiplication de composantes optoélectroniques qui ont envahi le marché. Certaines de ces composantes tels les capteurs à fibre optique développés en premier lieu par et pour l'industrie aérospatiale ont été identifiés comme offrant un excellent potentiel pour l'instrumentation de structures de génie civil. Donc, avec un système de détection permettant l'évaluation de l'état structural des ouvrages et de la progression des dégradations, la planification des interventions pourrait être réalisée beaucoup plus efficacement.

Un autre phénomène ayant augmenté l'intérêt porté aux capteurs à fibre optique par les intervenants du milieu du génie civil est l'émergence des polymères renforcés de fibres (PRF) comme matériau de construction. Les PRF ont été identifiés comme une des solutions intéressantes aux problèmes de corrosion des aciers d'armature. En effet, un des problèmes majeurs de dégradation est sans contredit la corrosion des aciers d'armature à l'intérieur des éléments de béton armé. La corrosion des aciers d'armature provoque la délamination, la fissuration, l'éclatement du béton et cela peut même aller jusqu'à la mise hors service d'une partie ou de la totalité d'un ouvrage.

L'utilisation de barres d'armature en polymères renforcés de fibres en remplacement des barres d'armature conventionnelle en acier pourrait régler les problèmes de corrosion. Ces matériaux étant, eux aussi d'application récente dans le domaine de la construction, leur comportement à long terme n'est pas encore bien connu d'où la nécessité de les instrumenter. Les capteurs à fibre optique, en raison notamment de leur dimension et de leur géométrie, sont les instruments de mesure les mieux adaptés pour cette tâche.

1.3 Thème de la recherche

Les résultats contenus dans ce mémoire, bien qu'explorant un nouveau domaine constitué des capteurs à fibre optique, se veut une continuité des travaux entrepris ces dernières années à l'Université de Sherbrooke concernant les barres d'armature en polymères renforcés de fibres (PRF). En effet, après les études d'évaluation des propriétés physico-mécaniques [CHAALLAL et BENMOKRANE, 1993 a, b et 1994], d'analyse et de design [MASMOUDI, 1995 et THÉRIAULT, 1998] et de durabilité [SIROIS, 1998 et ROBERT, à paraître], l'évaluation

d'un type de capteur à fibre optique pouvant être employé avec les PRF pour en déterminer le comportement dans des structures réelles, s'inscrit logiquement dans cette démarche.

L'étude comporte trois volets. Le premier volet est composé des essais de laboratoire effectués à l'Université de Sherbrooke sur les capteurs à fibre optique. Des essais thermiques et des essais mécaniques sur des barres d'armature d'acier, de PRFV (polymères renforcés de fibres de verre), de PRFC (polymères renforcés de fibres de carbone) et sur des éprouvettes de béton ont été réalisés ainsi que des essais de chargements cycliques sur une dalle de béton armé avec un treillis de PRFC.

Le deuxième volet traite des expérimentations réalisées en industries sur l'intégration de capteurs à fibre optique à l'intérieur de barres d'armature en PRF (fibres de verre et carbone) lors de leur procédé de fabrication.

Le troisième et dernier volet expose le projet du pont Joffre, où une partie de l'armature supérieure du tablier a été remplacée par un treillis fait de PRFC et a été instrumenté au moyen de plusieurs types d'instruments de mesure dont les capteurs à fibre optique.

1.4 Organisation du mémoire

Faisant suite à l'introduction, le **chapitre 2** expose quelques notions générales sur les capteurs à fibre optique ainsi que quelques-unes de leurs caractéristiques. Les notions contenues dans ce chapitre s'appliquent à différents types de capteurs à fibre optique.

Le **chapitre 3** consiste en une revue bibliographique des essais et applications réalisés avec les capteurs à fibre optique au cours des dernières années. Il y est question d'essais de laboratoire, d'intégration de capteurs à fibre optique dans les PRF et d'instrumentation d'ouvrages d'art.

Le **chapitre 4** présente le programme expérimental. Les essais faits en laboratoire ainsi qu'en industrie y sont décrits. Le programme et les manipulations concernant l'instrumentation du pont Joffre y sont aussi présentés.

Le **chapitre 5** expose les résultats obtenus lors des trois volets de l'expérimentation. Une analyse et une interprétation de ces résultats fait aussi partie de ce chapitre. L'étude est finalement complétée par les conclusions et recommandations de l'auteur.

2. NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA FIBRE OPTIQUE AINSI QUE SUR LES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE

2.1 Mise en situation

La gestion des infrastructures et la recherche du rendement optimal pour chaque dollar investi par les différents propriétaires de structures urbaines ont ouvert la voie au développement de technologies permettant l'évaluation et le suivi à long terme de ces ouvrages. Des structures touchées par cette nouvelle tendance, les ouvrages d'art sont certainement les structures bénéficiant présentement du plus fort engouement. Une nouvelle technologie innovatrice permettant l'évaluation et le suivi de ce type d'ouvrage consiste au développement de capteurs à fibre optique visant la collecte de divers paramètres. Ces paramètres permettent de connaître l'état actuel de la structure, de prédire son comportement futur ainsi que de fournir des informations pour la conception ultérieure de ces ouvrages. Ces renseignements deviennent encore plus importants lorsque des nouveaux matériaux comme les polymères renforcés de fibres (PRF) sont utilisés comme armature de renforcement en remplacement de l'acier conventionnel.

Le but de ce chapitre est de fournir certains éléments de base permettant au lecteur non expérimenté de se familiariser avec certains concepts et notions de base touchant le domaine de la fibre optique et plus particulièrement celui des capteurs à fibre optique.

2.2 Développement de la fibre optique

Une fibre optique peut être décrite comme un tube de verre plein qui sert de guide ou de support à un faisceau lumineux. Le tube comporte essentiellement deux parties: le cœur situé au centre, et la gaine optique située en périphérie. Ces deux composantes sont habituellement composées de silice, mais elles ont des indices de réfraction différents ($n_{\text{cœur}} \neq n_{\text{gaine}}$). Cette particularité est à la base du principe de propagation de la lumière à l'intérieur du cœur de la fibre optique par le phénomène de réflexion totale interne. Un faisceau lumineux est injecté à une extrémité dans le cœur de la fibre optique. Le faisceau se propagera en étant réfléchi à l'interface du cœur et de la gaine optique si l'angle avec lequel il frappe l'interface est inférieur à l'angle de réfraction pour ce type de fibre optique. Si cet angle γ est égal ou supérieur, il y aura réfraction du faisceau à l'extérieur du cœur de la fibre optique. Ce phénomène est qualifié de perte ou d'atténuation du faisceau optique. Le schéma de la figure 2.1 illustre le principe de propagation d'un faisceau optique à l'intérieur d'une fibre optique.

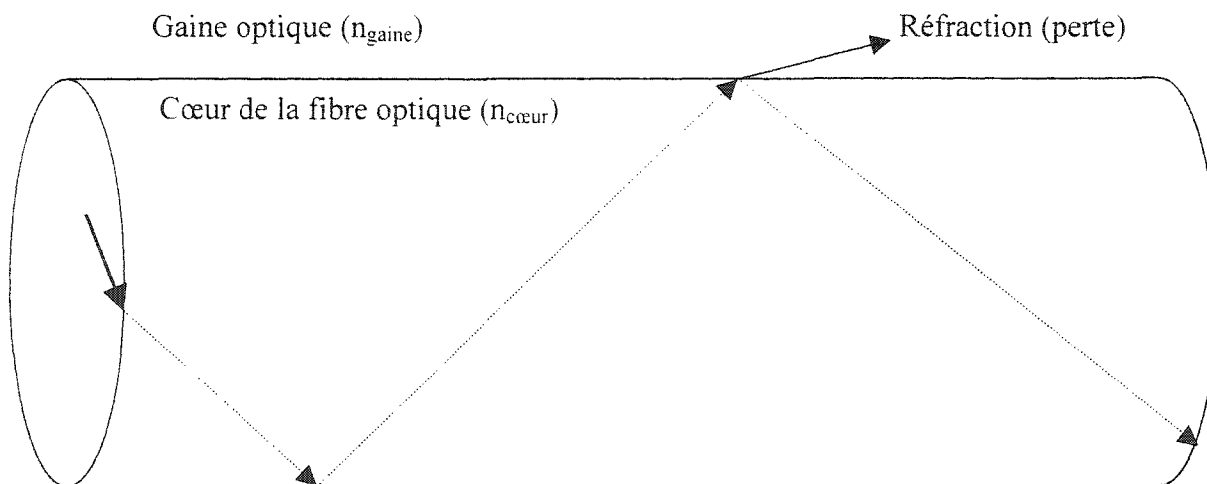


Figure 2.1 Schéma illustrant le principe de propagation d'un faisceau optique à l'intérieur d'une fibre optique

Le développement des capteurs à fibre optique a été possible à partir du moment où les fibres optiques ont été disponibles et assez évoluées pour permettre une telle application. On doit le développement de la fibre optique, au cours des années 70 et 80, aux chercheurs du domaine des télécommunications qui voulaient disposer d'un support pour être en mesure de transmettre des données, au moyen de la lumière, sur de très longues distances.

Mais l'intérêt pour la transmission de données au moyen de la lumière remonte beaucoup plus loin dans l'échelle du temps. L'utilisation de signaux optiques pour transmettre certains messages a commencé à être exploité par les civilisations anciennes. En effet, le Talmud¹ rapporte qu'il existait jadis, une liaison d'environ 800 km entre Jérusalem et Babylone qui fonctionnait au moyen de signaux optiques relayés par des postes intermédiaires. Les amérindiens ont utilisé, eux aussi, un système de signaux optiques. Ils allumaient des feux et se servaient de la fumée créée par ceux-ci pour communiquer entre tribus [SURMELY, 1995].

En 1880, Alexander Graham Bell inventa un appareil appelé le photophone avec lequel il réussit à transmettre un message sur quelques centaines de mètres en air libre au moyen de la lumière solaire. Le principe alors exploité par cet inventeur célèbre était la modulation de la lumière par des ondes sonores [UDD, 1992]. Une autre application célèbre de la lumière comme moyen de communication a pu être observée pendant la seconde guerre mondiale. La marine allemande a utilisé, lors de ce conflit, un système de projecteurs orientables à faisceaux infrarouges pour la communication entre ses navires et entre ses navires et ses bases terrestres [SURMELY, 1995]. Bien que ces idées furent très ingénieuses, ces méthodes de transmission demeuraient limitées en

¹ Ouvrage juif qui est une compilation de commentaires sur la loi mosaïque fixant l'enseignement des grandes écoles rabbiniques (Petit Larousse illustré, 1989)

raison des pertes importantes pouvant être engendrées par des conditions atmosphériques défavorables telles du brouillard, des nuages, de la pluie ou de la pollution par exemple.

Pour ne plus avoir à se soucier des conditions ambiantes, l'idée est venue à certains chercheurs de trouver un support physique autre que l'air libre pour guider les ondes lumineuses. C'est ainsi qu'au début du vingtième siècle, en 1910, la première étude théorique sur le guidage des ondes lumineuses par des diélectriques transparents a été publiée. Mais ce n'est qu'en 1950 que la première fibre de verre gainée est fabriquée [SURMELY, 1995]. Malgré cette évolution, il subsiste toujours un problème majeur de pertes lors de la propagation de la lumière dans ce petit tube de verre. Tant et aussi longtemps que ce problème n'allait pas être surmonté, la fibre optique ne pourrait prendre une place importante.

C'est la compagnie Corning's qui la première est parvenue à fabriquer une fibre optique à faible atténuation ou faible pertes [YEH, 1990]. Dès ce moment, des signaux optiques pouvaient être transmis sur de très longues distances et les applications, ayant comme point de départ cette technologie, n'ont cessé de se multiplier. Les domaines qui ont été grandement influencés sont aussi variés que la médecine, les télécommunications, l'aérospatiale et tout récemment, le génie civil.

2.3 Propriétés et caractéristiques des fibres optiques

2.3.1 Composition et gaines protectrices

Les fibres optiques sont généralement faites de quartz (SiO_2). La différence existant entre le cœur et la gaine optique réside dans l'addition de dioxyde de germanium (GeO_2) dans le cœur. Cela lui donne un indice de réfraction plus élevé et permet ainsi le principe de réflexion totale interne [ANSARI, 1997]. Cette composition des fibres optiques leur confère un comportement fragile de sorte qu'il est nécessaire d'envelopper la fibre optique d'une gaine mécanique lui procurant une certaine flexibilité. Ces gaines mécaniques sont composées généralement d'acrylate, de polyimide ou de résine époxydique. Des gaines formées avec divers métaux tels l'or, l'argent, l'aluminium ou une combinaison graphite/aluminium ont aussi déjà servi pour des applications particulières [UDD, 1994]. Des gaines mécaniques en carbone ont également été utilisées comme protection pour les fibres optiques [ROBERT et DAVIDSON, 1992].

2.3.2 Dimensions

Il existe sur le marché plusieurs types de fibres optiques mais leur géométrie demeure très similaire. De manière générale, le diamètre externe de ces fibres est de $125\text{ }\mu\text{m}$. Ceci comprend le cœur de la fibre optique qui varie habituellement entre 2 et $10\text{ }\mu\text{m}$ pour les fibres optiques monomodes (où il ne peut exister qu'un seul mode de propagation de la lumière) et entre 50 et $100\text{ }\mu\text{m}$ pour les fibres optiques multimodes (où plusieurs modes de propagation de la lumière

sont possibles). La gaine optique enveloppe le cœur de la fibre et complète ainsi la portion optique de la fibre. Les fibres optiques doivent être protégées par une gaine mécanique afin d'améliorer leur résistance aux agressions physiques et chimiques ainsi que pour en faciliter la manipulation [BARBACHI, 1995]. Cette gaine est appliquée directement par-dessus la gaine optique de sorte que le diamètre pratique d'une fibre optique est plutôt compris entre 150 et 250 μm dépendant du niveau de protection recherché. Il est à noter que commercialement, la grande majorité des fibres optiques utilisées dans le domaine des télécommunications ont un diamètre de 250 μm .

2.3.3 Phénomène d'atténuation

De manière à pouvoir transmettre un faisceau lumineux sur de grandes distances, le verre de la fibre optique doit être quasi parfait. Il demeure néanmoins toujours quelques impuretés et imperfections qui engendrent l'atténuation du signal optique comme les microfissures, les bulles d'air et les microcourbures.

L'atténuation est habituellement évaluée au moyen de la puissance d'un signal optique mesurée à l'entrée et puis à la sortie de la fibre optique. La relation entre ces deux puissances se présente sous la forme de l'équation suivante:

$$P = P_0 e^{-\alpha x} \quad [2.1]$$

Où P: puissance récupérée à la sortie de la fibre optique
P₀: puissance initiale ou à l'entrée de la fibre optique
 α : coefficient d'atténuation linéique
x: longueur de la fibre optique utilisée

Généralement, x est exprimée en km et α en dB/km.

2.3.4 Résistance mécanique

La fibre optique étant constituée de verre à haute teneur en SiO_2 , son comportement est donc de nature fragile. Le terme fragile réfère au mode de rupture qui se produit sans que le matériau ne montre de comportement plastique comme l'acier par exemple. Le comportement demeure élastique jusqu'à la rupture.

Malgré une résistance à la traction pouvant théoriquement atteindre 5 000 MPa et des déformations élastiques de l'ordre de 10% [DAVIES et coll., 1986] lorsqu'il y a absence complète de microfissures, la résistance à la traction des fibres optiques comportant certains défauts se situe habituellement aux environs de 1 400 MPa [QUIRION et coll., 1998].

2.3.5 Températures

Les fibres optiques à base de silice ont un point de fusion théorique qui se situe autour de 1 400°C. De manière pratique, la limite se retrouve plutôt à environ 1 000°C, température à laquelle certains éléments du cœur de la fibre deviennent instables et tendent à migrer hors de celui-ci. Les applications faisant appel aux fibres optiques à base de silice ne dépassent généralement pas 700°C, afin de garder une marge de sécurité. Il est par contre possible de fabriquer des fibres optiques à base de saphir ayant le potentiel de supporter des températures allant jusqu'à 2 000°C [UDD, 1994]. Les fibres optiques à base de silice ont un coefficient de dilatation thermique typique de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ [MAASKANT et coll., 1997].

2.3.6 Durabilité

De manière générale, lorsqu'il est question de durabilité, un consensus se dégage à savoir que les fibres optiques sont théoriquement très durables [SURMELY, 1995; MAASKANT et coll., 1997] étant donné qu'elles sont chimiquement inertes. Leur grande durabilité s'appuie sur le fait que les fibres optiques peuvent résister à des températures et pressions élevées [UDD, 1994; QUIRION et BALLIVY, 1998], qu'elles ne corrodent pas [ANSARI, 1997] et qu'elles résistent bien aux chocs et aux vibrations [UDD, 1994].

Un des facteurs pouvant compromettre la durabilité des fibres optiques est l'humidité. Les fibres optiques sont sujettes à absorber l'humidité et à se détériorer plus rapidement surtout si elles sont soumises à une contrainte de traction importante en présence d'humidité [MAASKANT et coll., 1997]. Les gaines employées pour envelopper les fibres optiques doivent donc tenir compte de ce comportement et assurer une protection adéquate contre ce type de détérioration.

Lorsque les fibres optiques sont employées dans un environnement alcalin comme le béton, il est nécessaire de leur procurer une gaine protectrice adéquate pour assurer leur durabilité et leur performance à long terme [de VRIES et coll., 1997; HABEL et coll., 1997; ANSARI, 1997]. La solution interstitielle habituellement retrouvée dans les pores du béton est fortement alcaline de sorte qu'une réaction entre les alcalis de cette solution et la silice de la fibre optique est possible [MAASKANT et coll., 1997].

Malgré le potentiel intéressant de durabilité que les fibres optiques semblent offrir, il existe présentement un manque de connaissance sur la stabilité chimique et mécanique des fibres optiques à long et très long terme.

2.4 Capteurs à fibre optique

Le développement de la technologie des capteurs à fibre optique est tout d'abord passé par le développement de composantes et de systèmes optiques plus simples. Les capteurs à fibre optique et leur système d'acquisition de données sont généralement le résultat de la combinaison de plusieurs composantes ou systèmes optiques de base. Il apparaît tout d'abord essentiel de définir ce que sont les capteurs à fibre optique ainsi que certains principes généraux concernant leur mode de fonctionnement.

Un capteur à fibre optique typique est composé des éléments suivants: une voie permettant la transmission d'un signal optique de la source émettrice jusqu'à la partie sensible du capteur, une zone sensible permettant la modulation du signal optique en réaction à l'influence de l'environnement extérieur et une voie de transmission du signal optique (qui a été modulé par la zone sensible) jusqu'au système d'interprétation des données. La figure 2.2 montre un schéma d'un capteur à fibre optique de configuration courante.

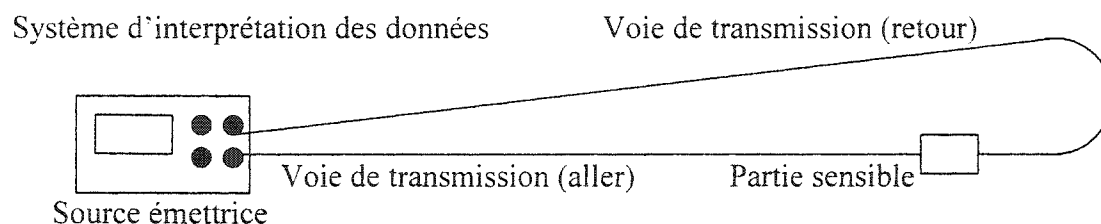


Figure 2.2 Schéma illustrant un capteur à fibre optique de configuration courante

La source émettrice est habituellement constituée d'une diode électroluminescente, d'un laser ou d'un simple filament produisant une lumière blanche. Elle émet un signal optique qui sert à interroger la zone sensible du capteur. Les voies de transmission sont évidemment constituées de fibres optiques qui servent de lien entre la source, la zone sensible et le système d'interprétation des signaux ou poste de lecture. La partie ou zone sensible du capteur peut être située à l'intérieur de la fibre optique (intrinsèque) ou à l'extérieur de celle-ci (extrinsèque). La fibre optique est sensible, de part sa nature, à certains phénomènes de son environnement mais elle doit subir, dans la plupart des applications, différents traitements ou manipulations afin de devenir l'instrument de mesure recherché.

2.4.1 Paramètres mesurés

Les capteurs à fibre optique, en raison de leur grande versatilité, peuvent servir à la mesure de plusieurs paramètres. Des capteurs à fibre optique ont déjà été utilisés pour mesurer des paramètres tels que les déformations et indirectement les contraintes, les vibrations et les impacts, les températures, les pressions, le pH [RICKA et TANAKA, 1984], la présence et la concentration de certains ions tel les ions chlore dans le béton [HUSTON et FUHR, 1998], l'humidité et la teneur en eau d'un sol [MICHIE et coll. 1997], la viscosité et le niveau de fluides, la concentration de gaz [UDD, 1994], la détection de fissures dans le béton [Rossi et LeMaou, 1989] et de l'ouverture de celles-ci [ANSARI et NAVALURKAR, 1993], la teneur en air dans le béton frais [ANSARI, 1990], l'injection de coulis dans les gaines autour des câbles de précontrainte [MICHIE et coll., 1994] ainsi que la mesure du débit de circulation des véhicules et de leur poids [VOHRA et coll., 1998 et IDRIS et coll., 1998].

2.4.2 Modes ou principes généraux de fonctionnement

Les capteurs à fibre optique sont habituellement caractérisés par leur principe physique de fonctionnement. Présentement, il existe trois grandes catégories regroupant les capteurs à fibre optique qui sont les capteurs interférométriques, les capteurs spectrométriques et les capteurs intensimétriques.

Les capteurs interférométriques utilisent le phénomène d'interférence des ondes lumineuses afin de mesurer divers paramètres. Le principe général réside dans le fait que deux ou plusieurs ondes lumineuses ayant parcouru des trajets différents présentent une différence de phase ou déphasage. La comparaison de l'interférence produite lors de la superposition de ces deux ou plusieurs ondes, après leur parcours respectif, permet donc d'évaluer le paramètre mesuré. Les principaux capteurs faisant partie de ce groupe sont les capteurs Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac et Fabry-Pérot. Le capteur interférométrique de type Fabry-Pérot sera décrit en détail au cours d'une prochaine section du présent chapitre, ce type de capteur faisant l'objet de la présente étude. Les capteurs polarimétriques, bien qu'ils soient des capteurs interférométriques, forment une sous-catégorie dans cette famille. Ils sont basés sur la mesure de la différence de phase des ondes lumineuses suivant les directions de polarisation orthogonales. Donc, en comparant l'interférence produite par les ondes lumineuses orthogonales, il est possible, par corrélation, de quantifier une perturbation transmise à la fibre optique par l'environnement externe.

Les capteurs spectrométriques, quant à eux, sont basés sur la mesure de la différence de longueur d'onde des signaux optiques. Une variation de la longueur d'onde peut être causée par un changement dans l'environnement du capteur (déformation, changement de température, etc) et

donc être mesuré en corrélant cette perturbation avec la variation de la longueur d'onde correspondante. Les capteurs de type réseau de Bragg font partie de cette catégorie.

Finalement, les capteurs intensimétriques sont basés sur la variation de l'intensité du signal optique. Les intensités à l'entrée et à la sortie du capteur sont mesurées et comparées de manière à évaluer l'atténuation du signal optique. Une façon courante d'utiliser ce principe est d'induire des microcourbures en surface de la fibre optique de manière à provoquer une diminution de l'intensité du signal par réfraction. Cette diminution correspond à un changement de l'environnement dans lequel est placé le capteur, et ce changement peut donc être quantifié par corrélation. Ces capteurs sont avantageux sur le plan de leur simplicité de fabrication et de leur compatibilité avec les fibres optiques multimodes.

2.4.3 Caractéristiques et particularités

Les capteurs à fibre optique offrent la possibilité de mesurer les mêmes paramètres qui étaient mesurés auparavant avec les autres types de capteurs (jauges électriques, cordes vibrantes, etc.) mais ils ont aussi le potentiel d'être utilisés à de nouvelles applications. Les caractéristiques et particularités les différenciant des autres types de capteurs sont donc:

- la possibilité d'intégration dans des environnements hostiles dont notamment les matériaux composites ou polymères renforcés de fibres (PRF);

- la possibilité d'intégration de manière non-obstructive, c'est-à-dire n'engendrant pas l'affaiblissement de l'élément fabriqué;

- leur résistance à de hautes températures et pressions;

- leur grande précision;

- leur grande sensibilité;

- leur vaste plage de mesure;
- leur géométrie variable;
- leur petite taille;
- leur faible poids;
- la possibilité de multiplexage, c'est-à-dire d'aligner plusieurs capteurs sur la même fibre optique;
- leur aptitude à servir à la fois de capteur et de transmetteur de données;
- leur temps de réponse très rapide;
- leur neutralité face aux interférences électromagnétiques et aux fréquences radio;
- leur fonctionnement sans effet de dissipation de chaleur;
- leur stabilité chimique (ne corrode pas);
- leur grande durabilité; et
- leur potentiel de production à faible coût.

Les capteurs à fibre optique laissent donc entrevoir une multitude d'applications pour lesquelles il serait possible et avantageux de les utiliser.

2.5 Capteurs à fibre optique extrinsèques Fabry-Pérot utilisés dans le cadre de ce programme de recherche

Le type de capteur principalement utilisé dans le cadre de ce projet de recherche est une jauge extensométrique extrinsèque à fibre optique Fabry-Pérot de modèle SFO qui fait partie de la gamme de capteurs à fibre optique SENSOPTIC. Cette gamme de capteurs à fibre optique est commercialisée par la compagnie Roctest Ltée et comprend aussi les jauges EFO (qui peuvent être enfouies dans le béton), SFO-W (qui peuvent être soudées en surface d'un élément d'acier) et TFO-H (qui mesurent la température). Ces capteurs, bien qu'ils soient conçus pour des

applications différentes, fonctionnent tous selon le même principe. La suite de cette section est donc consacrée à la description et à l'explication du principe de fonctionnement de ces capteurs.

Tout d'abord, le capteur de type SFO est constitué de deux bouts de fibres optiques multimodes de 125 μm de diamètre qui sont soudées par fusion à l'intérieur d'un microcapillaire en verre de 200 μm de diamètre. La distance séparant les points de soudure constitue la longueur de la jauge " l_0 ". Cette valeur est la longueur de référence et est appelée facteur de jauge. Elle est mesurée et déterminée lors de la fabrication des capteurs.

Les deux bouts de fibres optiques sont situés face à face et sont séparés par une distance " d ", qui forme un vide rempli d'air appelé cavité Fabry-Pérot. Une mince pellicule de revêtement mi-réfléchissant enduit chacune des extrémités des fibres optiques se faisant face dans la cavité Fabry-Pérot. Cet arrangement rattaché à une fibre optique multimode de 125 μm , pour l'acheminement des signaux optiques, forme le capteur SFO. Le schéma de la figure 2.3 illustre le capteur SFO et son principe de fonctionnement.

La déformation est calculée en faisant le rapport entre la variation de la longueur de la cavité Fabry-Pérot, suite à une contrainte, et la longueur de la jauge (ou facteur de jauge) comme suit:

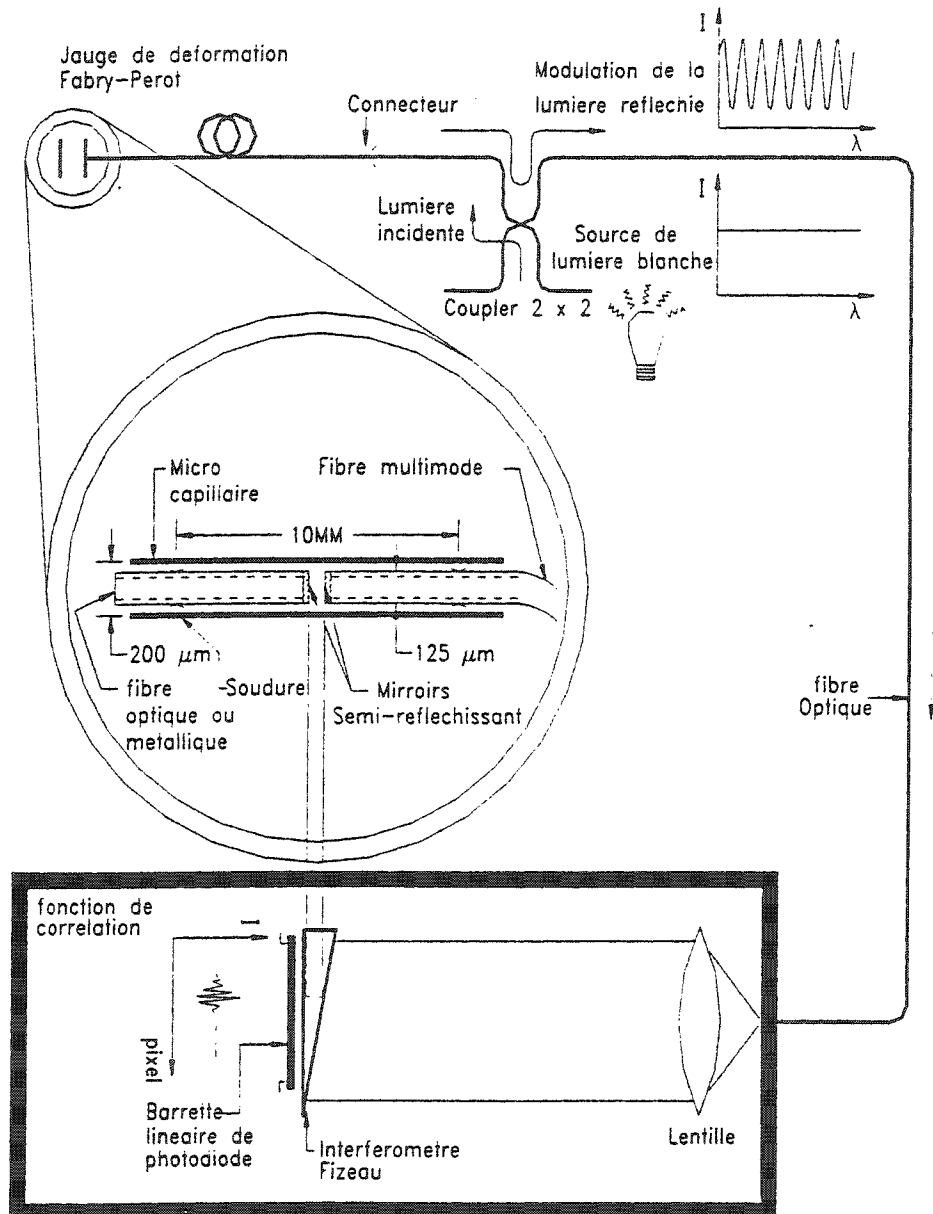
$$\frac{(d_1 - d_2)}{l_0} = \varepsilon \quad [2.2]$$

où: d_1 est la longueur initiale de la cavité ou la distance initiale séparant les deux extrémités des fibres optiques avant déformation, en nm

d_2 est la longueur actuelle de la cavité ou la distance actuelle séparant les deux extrémités des fibres optiques (après déformation), en nm

l_0 est la longueur de la jauge ou facteur de jauge (valeur fixe), en mm

ϵ est la déformation, en $\mu\epsilon$



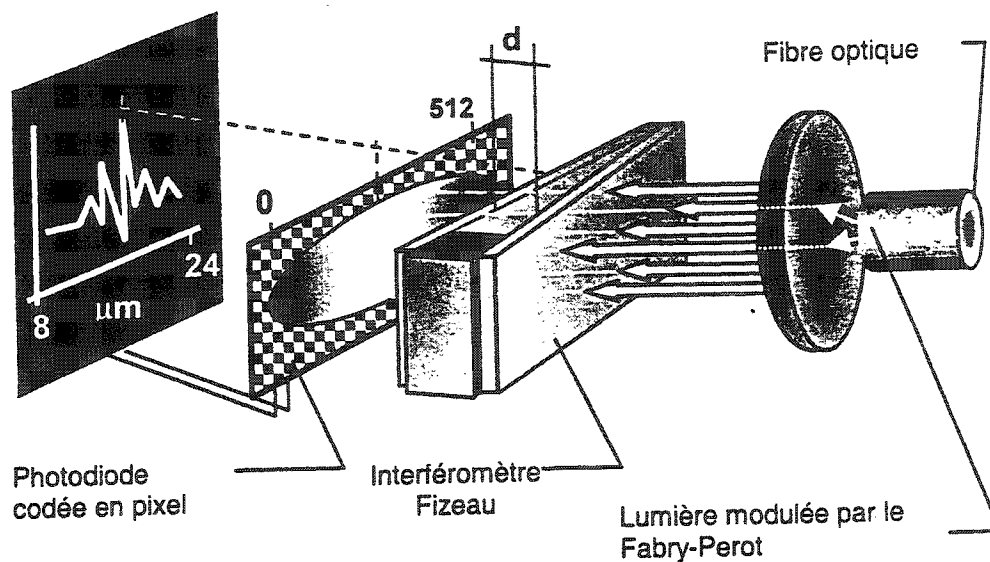
[tirée de ROCTEST LTÉE, 1996]

Figure 2.3 Schéma illustrant le principe de fonctionnement du capteur à fibre optique SFO

À l'extrémité opposée du capteur Fabry-Pérot, un connecteur de type SP est fixé à la fibre optique de manière à pouvoir réaliser un branchement sur le poste de lecture. Ce dernier sert simultanément de source lumineuse et de centre d'analyse et d'interprétation des signaux optiques modulés par la cavité Fabry-Pérot.

Le poste de lecture comprend entre autre l'interféromètre Fizeau (faisant l'objet d'un brevet), qui est la composante permettant la mesure de la longueur de la cavité Fabry-Pérot. L'interféromètre Fizeau consiste en deux plaques de verre mise l'une sur l'autre, mais entre lesquelles, à une extrémité, une cale est insérée. Cet arrangement permet d'obtenir un espacement variable entre les deux plaques de verre lorsqu'on se déplace d'un côté à l'autre. Au moment où le signal optique modulé par la cavité Fabry-Pérot vient traverser l'interféromètre Fizeau, il y a transmission maximale de ce signal à l'endroit qui correspond exactement à la distance " d " ou longueur de la cavité Fabry-Pérot. Donc, l'interféromètre Fizeau fournit une reproduction optique de la distance séparant les extrémités des deux bouts de fibre optique formant la cavité Fabry-Pérot.

À l'arrière de l'interféromètre Fizeau, une barrette linéaire de photodiodes à haute densité est disposée et permet de déterminer la position exacte du signal d'intensité maximale. La disposition des pixels composant cette photodiode est telle que chacun d'entre eux correspond à une valeur " d " de la longueur de la cavité Fabry-Pérot. La figure 2.4 montre un schéma illustrant le traitement du signal optique à l'intérieur du poste de lecture, après qu'il a été modulé par son passage dans la cavité Fabry-Pérot.



[Tirée de QUIRION ET COLL., 1998]

Figure 2.4 Schéma illustrant le traitement du signal optique à l'intérieur du poste de lecture

Ce montage optique permet d'obtenir une sensibilité de $0.25 \mu\text{m}$ et une plage de lecture pouvant varier de $\pm 1\,000$ à $\pm 10\,000 \mu\text{m}$. Les espacements de cavité "d", pouvant être mesurés en valeur absolue, sont compris entre $8\,000$ et $24\,000 \text{ nm}$. Donc, par exemple, un capteur ayant une plage d'utilisation de $-2\,500$ à $+2\,500 \mu\text{m}$ sera fabriqué avec une ouverture initiale de cavité de l'ordre de $16\,000 \text{ nm}$, ce qui constitue le point milieu entre les ouvertures minimales ($8\,000 \text{ nm}$) et maximales ($24\,000 \text{ nm}$). De cette manière, le capteur possède la même aptitude à l'élongation qu'à la compression. En suivant le même raisonnement, il est facile de comprendre qu'un capteur ayant une plage d'utilisation de $-1\,000$ à $+10\,000 \mu\text{m}$ sera bâti en plaçant les bouts de fibre optique pour que l'ouverture initiale soit de l'ordre de $10\,000 \text{ nm}$, de manière à obtenir une plus grande possibilité d'élongation que de compression.

Entre le poste de lecture et le capteur, la fibre optique est protégée physiquement et chimiquement par ce qu'il est convenu d'appeler un câble à fibre optique. Ce câble retarde la détérioration qu'engendre l'humidité et les agents agressifs et améliore la résistance et la malléabilité de la fibre optique. Plusieurs matériaux sont utilisés pour constituer ce câble de protection tels du téflon, du PVC et du kevlar pour ne nommer que ceux-là.

3. CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE EN GÉNIE CIVIL: ESSAIS ET APPLICATIONS

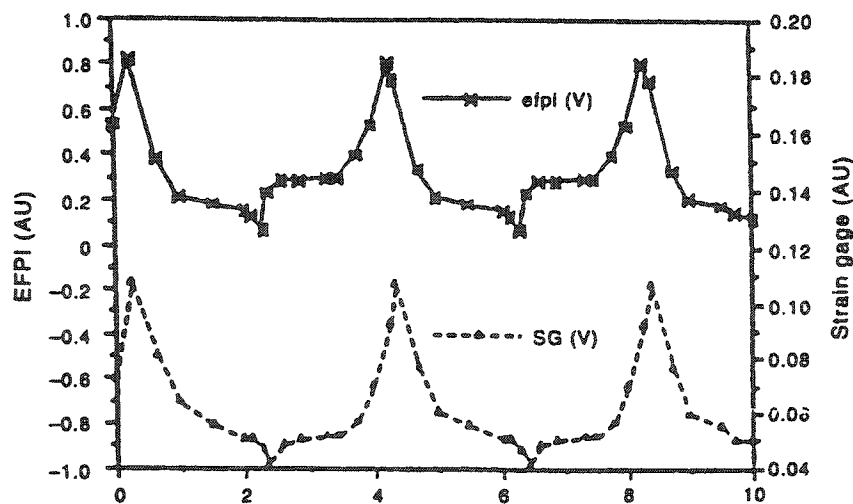
Récemment, la technologie de la fibre optique s'est étendue jusqu'au domaine du génie civil dans le but de fournir aux ingénieurs et gestionnaires de structures un autre moyen d'évaluer les déformations, températures, efforts et agressions chimiques que peuvent subir ces structures. Et ce, en ouvrant aussi la voie à de nouvelles applications ne pouvant pas être réalisées avec les instruments conventionnels. Donc, il existe présentement, et depuis peu sur le marché, des capteurs à fibre optique permettant de mesurer certains paramètres-clés agissant sur la vie en service et la durabilité de différentes structures soumises aux contraintes de leur environnement.

Suite au développement de ces capteurs et à l'intérêt porté vers ceux-ci, plusieurs études ont été réalisées en laboratoire sur la performance et le comportement des capteurs à fibre optique. Aussi des essais sur l'intégration de capteurs à fibre optique dans des éléments de polymères renforcés de fibre (PRF) ont été réalisés en laboratoire et en industrie. De plus, quelques structures réelles ont été instrumentées, en particulier des ouvrages d'art, pour faire la démonstration que ces nouveaux instruments de mesure permettraient une meilleure gestion des infrastructures urbaines. Ce chapitre se veut donc un résumé de quelques expérimentations réalisées avec différents types de capteurs à fibre optique.

3.1 Revue d'essais en laboratoire sur les capteurs à fibre optique

Ces dernières années, plusieurs essais ont été réalisés en laboratoire sur les capteurs à fibre optique dans le but de vérifier leur comportement sous différentes conditions de chargement.

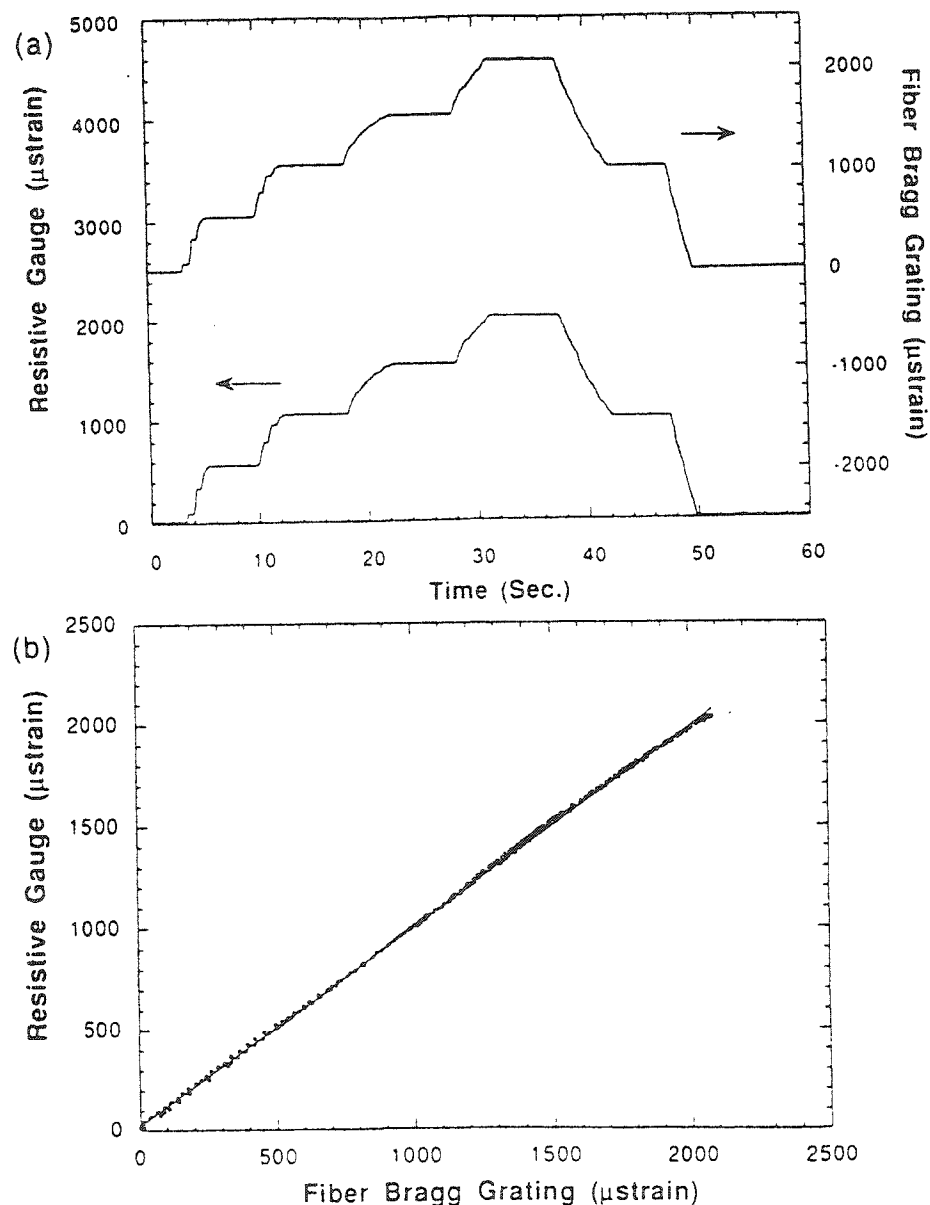
Une étude réalisée sur un modèle réduit d'une structure multi-étagée de béton armé a permis de faire la comparaison entre des jauges électriques et des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot [MASRI et coll., 1994]. Les capteurs étaient collés sur les barres de l'armature principale et sur les étriers de certaines poutres et colonnes. La figure 3.1 présente un graphique de la déformation en fonction du temps d'un de ces capteurs à fibre optique et de la jauge électrique correspondante. Ces résultats montrent une relation linéaire des déformations entre les deux types de capteurs.



[tirée de MASRI et coll., 1994]

Figure 3.1 Comparaison entre un capteur à fibre optique et une jauge électrique

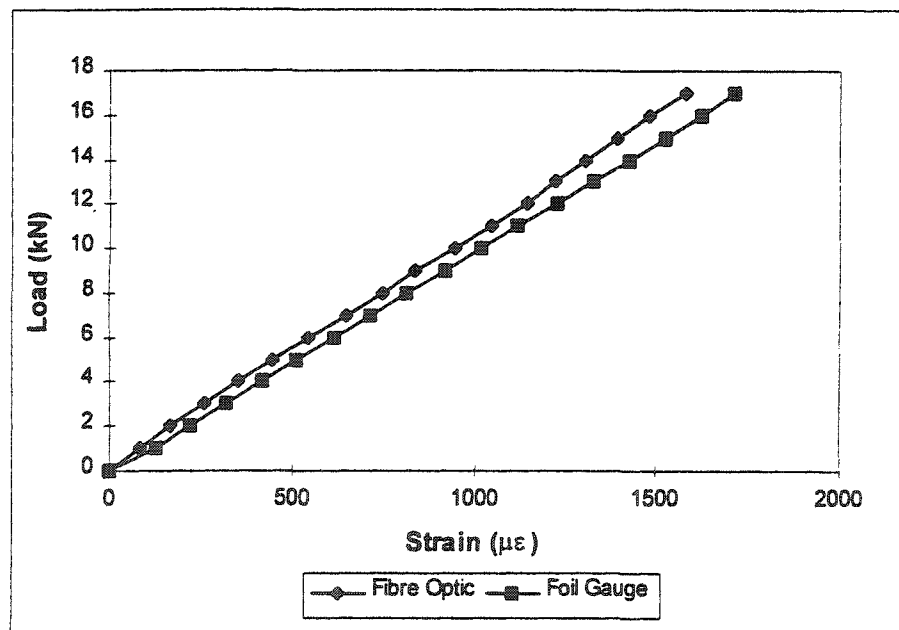
Un autre groupe de chercheurs [DAVIS et coll., 1997] a fait des essais de comparaison entre des capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg et des jauges électriques. Les essais de laboratoire ont consisté en des essais de flexion sur une petite plaque en aluminium sur laquelle était collée, côte-à-côte, un capteur Bragg et une jauge électrique. Les figures 3.2 a et b montrent les résultats obtenus lors de ces essais. Une excellente corrélation a donc été obtenue entre ces capteurs.



[tirée de DAVIS et coll., 1997]

Figure 3.2 a) Comparaison entre un réseau de Bragg et une jauge électrique
b) Corrélation entre un réseau de Bragg et une jauge électrique

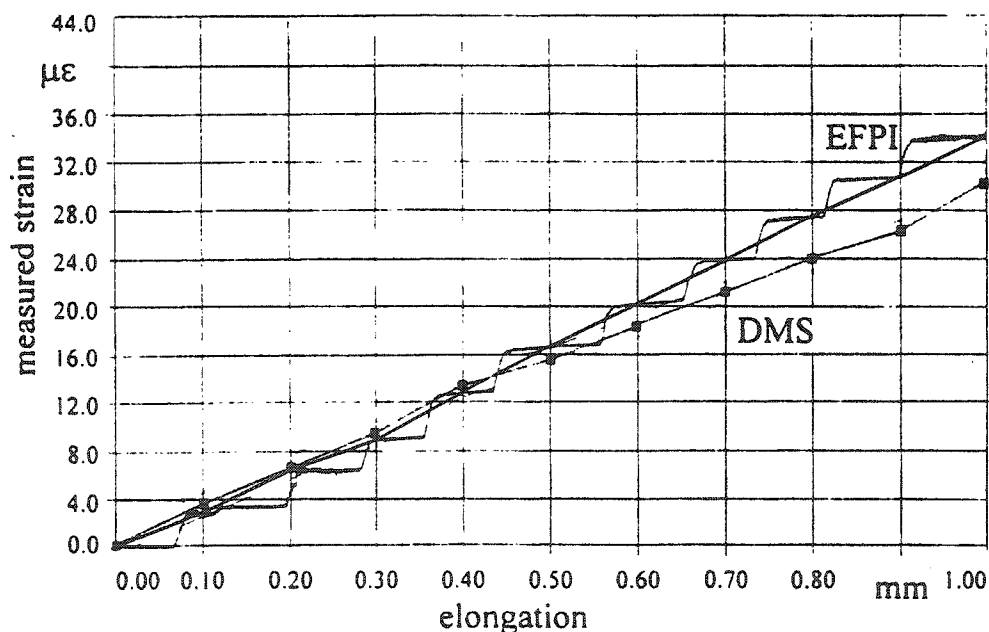
Une autre série d'essais avec un autre modèle de capteur à fibre optique de type réseau de Bragg a été menée sur une plaque d'aluminium par des chercheurs canadiens [DONCASTER, 1997]. Ces essais ont consisté à coller une jauge électrique et un réseau de Bragg sur les faces opposées de cette plaque d'aluminium et à y appliquer une contrainte de tension. Les résultats obtenus montrent, qu'à une déformation de l'ordre de 1 500 $\mu\epsilon$, le capteur à fibre optique indiquent des valeurs moyennes de 9 % inférieures à la jauge électrique. La figure 3.3 présentent les valeurs obtenues lors d'un des quatre essais réalisés sur cette plaque. Selon l'auteur, deux phénomènes pourraient expliquer cette différence soient la flexion de la plaque d'aluminium lors de l'essai de traction ou un mauvais fonctionnement du poste de lecture.



[tirée de DONCASTER, 1997].

Figure 3.3 Comparaison entre un capteur à fibre optique de type réseau de Bragg et une jauge électrique collés sur les faces opposées d'un échantillon en aluminium

Une autre étude [HABEL et coll., 1997] réalisée sur des capteurs à fibre optique extrinsèques de type Fabry-Pérot fait une comparaison entre ces capteurs et des jauges électriques. L'étude a été réalisée sur différents échantillons soient des barres d'armature conventionnelles en acier, une plaque d'acier et une barre de section carrée en aluminium. Des essais de traction ont été réalisés sur ces échantillons et les résultats ont démontré qu'il y avait une différence dans les réponses des capteurs à fibre optique et des jauges électriques. Ce phénomène a été observé sur les différents échantillons et ce à un faible niveau de déformation variant de 16 à 35 $\mu\epsilon$ dans ce cas-ci. La figure 3.4 montre ce comportement entre une jauge électrique (DMS) et un capteur à fibre optique (EFPI) tous deux installés sur une barre d'armature en acier soumise à un chargement engendrant une déflexion dans le domaine élastique. Il est à noter, ici que c'est la fibre optique qui présente des déformations plus élevées que la jauge électrique.



[tirée de HABEL et coll., 1997]

Figure 3.4 Comparaison entre un capteur à fibre optique extrinsèque Fabry-Pérot et une jauge électrique installés sur une barre d'armature d'acier

CHEN et coll. (1998), rapportent les résultats d'une étude précédente [ANSARI et LIBO, 1998] portant sur l'étalonnage de lectures prises avec des capteurs à fibre optique. L'objectif de cette étude était de développer une relation entre les déformations structurales réelles et les déformations mesurées par les capteurs à fibre optique. Cette expérimentation a été menée sur une poutre de type cantilever sur laquelle étaient collés des capteurs à fibre optique de différentes longueurs et des jauges électriques. Les résultats obtenus indiquent que les capteurs à fibre optique donnent des valeurs de déformation équivalentes à une fraction des valeurs recueillies par les jauges électriques. Cette fraction dépend de la longueur de jauge du capteur à fibre optique et des propriétés mécaniques de celui-ci. La relation est donc linéaire et elle a été exprimée de la manière suivante par les auteurs cités précédemment:

$$\varepsilon_g = \alpha(k, L)\varepsilon_{sg} \quad [3.1]$$

où ε_g : déformation enregistrée par le capteur à fibre optique

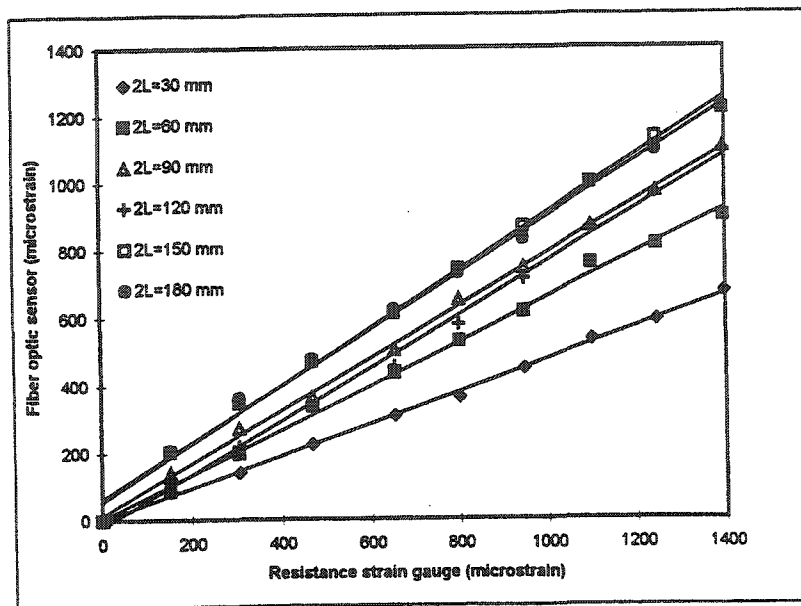
α : coefficient de proportionnalité entre les deux mesures

ε_{sg} : déformation enregistrée par la jauge électrique

k : influence des propriétés mécaniques

L : influence de la longueur de jauge

La figure 3.5 présente quelques-uns des résultats obtenus lors de cette expérimentation sur l'établissement d'une relation entre les capteurs à fibre optique et les jauges électriques.



[tirée de CHEN et coll. 1998]

Figure 3.5 Comparaison entre des capteurs à fibre optique de différentes longueur et des J.E.

3.2 Intégration dans des armatures en polymères renforcés de fibres (PRF)

Plusieurs caractéristiques des capteurs à fibre optique telles leurs petites dimensions, leur géométrie filamenteuse, leur faible poids, leur résistance aux températures élevées, l'absence d'un effet de dissipation de chaleur lors de leur fonctionnement et leur durabilité font qu'ils sont d'excellents candidats pour l'intégration dans les matériaux composites.

Les recherches dans ce champ d'intérêt ont débuté par des expérimentations sur des laminés pour, par la suite, évoluer vers des applications touchant des éléments de PRF fabriqués au moyen du

procédé de pultrusion. Lors de ces expérimentations, différentes gaines ont été utilisées pour protéger les capteurs à fibre optique.

Les prochaines sous-sections présentent donc une description de la fabrication des PRF et certains résultats obtenus par des chercheurs ayant menés des études sur l'intégration des capteurs à fibre optique dans les matériaux composites.

3.2.1 Procédés de fabrication des PRF

L'objectif des procédés de fabrication des matériaux composites est de créer un élément solide ayant certaines propriétés en fusionnant ensembles la matrice ou résine (résines polyesters, vinylesters, et époxydes) et les fibres de renforcement (fibres de verre, de carbone et d'aramide). Pour parvenir à cette fin, il existe quelques procédés actuellement employés qui sont l'enroulement filamentaire, la compaction sous vide, les moules adaptés, la superposition et compaction par charges mortes et la pultrusion [MASMOUDI, 1995].

Le procédé d'enroulement filamentaire consiste à tremper des fibres dans une résine pour ensuite les enrouler parallèlement autour d'un cylindre avec un mouvement de va-et-vient qui détermine l'épaisseur de l'élément. Le cylindre est laissé en place le temps nécessaire au mûrissement de la résine et est ensuite retiré pour dégager l'élément. Ce procédé est employé principalement pour la fabrication de fuselages d'avion, de tubes et de réservoirs.

Le procédé de compaction sous vide exploite le principe du vide d'air à l'intérieur d'un moule pour produire une force qui donne sa forme au matériau composite. Un exemple d'application de

ce procédé est l'arrangement de couches de fibres pré-imprégnées de résine et placées dans un moule duquel l'air est extirpé au moyen d'une pompe ce qui a pour effet de compacter les couches les une sur les autres [NANNI, 1993].

Le procédé dit de moule adapté désigne en fait la fabrication d'élément dont la forme et les dimensions sont définies par un moule spécifique. En règle générale, ce sont des fibres discontinues qui sont utilisées et leur arrangement aléatoire donne à l'élément fabriqué des propriétés quasi-isotropiques [MASMOUDI, 1995].

La superposition et compaction par charges mortes est le procédé employé pour la fabrication du treillis Nefmac. Il consiste à déposer plusieurs couches de fibres pré-imprégnées en sens longitudinal alternativement avec des couches de fibres en sens transversal et à compacter le produit au moyen de charges mortes agissant uniformément sur le treillis ainsi formé. Ce procédé de fabrication sera expliqué plus en détail au chapitre suivant.

La pultrusion est un procédé qui consiste à acheminer les filaments de plusieurs bobines de fibres vers un bassin de résine où ceux-ci sont enduits. Après le bassin de résine, une filière de préformation est disposée et elle permet d'extraire l'air piégé dans la matrice et évacue l'excédent de résine. Les fibres sont par la suite tirées vers une chambre chauffante où l'élément fabriqué prend sa configuration finale par compaction et chauffage des fibres et de la résine [MASMOUDI, 1995].

3.2.2 Tentative d'intégration de capteurs à fibre optique de type SFO

Une équipe de chercheurs canadiens [KALAMKAROV et coll., 1997] a effectué une étude sur l'intégration de capteurs à fibre optique extrinsèques de type Fabry-Pérot dans des barres d'armature en matériaux composites fabriquées sur une machine expérimentale reproduisant le procédé de pultrusion. L'expérimentation a été réalisée sur des barres d'armature composée de fibres de carbone et de résine vinylester. Les fibres optiques avaient une longueur de deux mètres et étaient protégées par une gaine mécanique de polyimide pouvant résister à des températures d'environ 350°C.

Sur le montage expérimental, les fibres passent dans un bain de résine et sont distribuées uniformément sur la section transversale de la barre par une série de carte de polyéthylène haute densité spécialement machinées. Par la suite, elles entrent dans la chambre de pultrusion qui comporte trois zones de température pouvant être contrôlées indépendamment les unes des autres. La force d'entraînement est fournie par deux jeux de roues qui permettent d'obtenir une vitesse constante de production. Un fin brin de fibres est positionné au centre de la section de la barre. Le bout de la fibre optique y étant collé, il permet d'acheminer cette dernière au travers du système d'alimentation en fibres et d'assurer une position centrale au capteur lors de la fabrication de la barre.

Suite à une tentative non fructueuse d'intégration où les capteurs à fibre optique ont cessé de fonctionner pendant l'intégration ou pendant la période de refroidissement de l'élément fabriqué, il a été décidé de fragmenter le procédé de pultrusion.

Le premier paramètre analysé a été la pression de compactage des fibres. Un capteur à fibre optique a été inséré à l'intérieur des fibres mais sans que celles-ci n'aient été imprégnées de résine. Aucune élévation de température n'a été appliquée de sorte que ce soit seulement les fibres qui puissent agir sur le capteur. Le suivi du comportement du capteur a été fait pendant la progression de la fibre optique et des fibres de carbone dans la chambre de pultrusion. La figure 3.6 présente l'évolution des déformations obtenues avec le capteur à fibre optique en fonction de la position de celui-ci dans la chambre de pultrusion. Un examen de ce graphique indique que les déformations varient entre $-15 \mu\epsilon$ et $+15 \mu\epsilon$ lorsque le capteur progresse dans la chambre de pultrusion. De plus, les déformations reviennent à leur valeur initiale à la sortie de la chambre de pultrusion. Cette faible variation des déformations indique que l'influence du compactage des fibres sur le capteur à fibre optique est quasi-négligeable. Après sa sortie de la chambre de pultrusion, un technicien a récupéré le capteur et il l'a saisi entre deux doigts. Ceci explique l'augmentation des déformations jusqu'à environ $70 \mu\epsilon$ qui peut être remarquée sur le graphique.

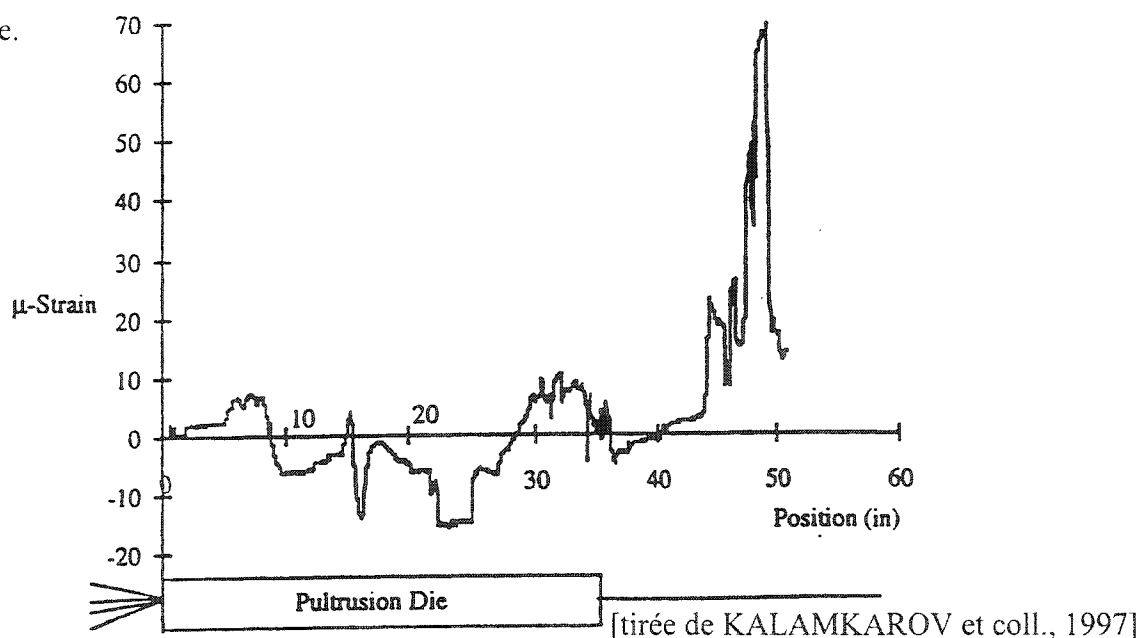


Figure 3.6 Réponse d'un capteur SFO au procédé de pultrusion avec fibres mais sans résine et sans augmentation de température

Le deuxième paramètre ajouté a été la température. La chambre de pultrusion a été placée dans des conditions de température habituellement utilisées pour le mûrissement de la résine. Donc, pour cette étape, le capteur à fibre optique était inséré au centre des fibres de carbone et il était soumis au profil de température de mûrissement. La température maximale à l'intérieur de la chambre était de 150°C. Le capteur a donc été soumis aux conditions de température prévalant lors du procédé normal de fabrication des barres. La figure 3.7 montre l'évolution des déformations obtenues avec le capteur à fibre optique en fonction de la position de celui-ci dans la chambre de pultrusion. L'effet de la température est plus important que le compactage des fibres étant donné les déformations positives augmentant jusqu'à 580 $\mu\epsilon$. Mais cette valeur demeure de beaucoup inférieure à la limite du capteur qui est de 5 000 $\mu\epsilon$. Le profil des déformations suit de près le profil des températures et un coefficient de dilatation thermique de $4,46 \cdot 10^{-6}$ m/m°C a été calculé. Après que la température soit revenue à la température ambiante, le capteur a indiqué à nouveau sa lecture initiale et il est demeuré opérationnel.

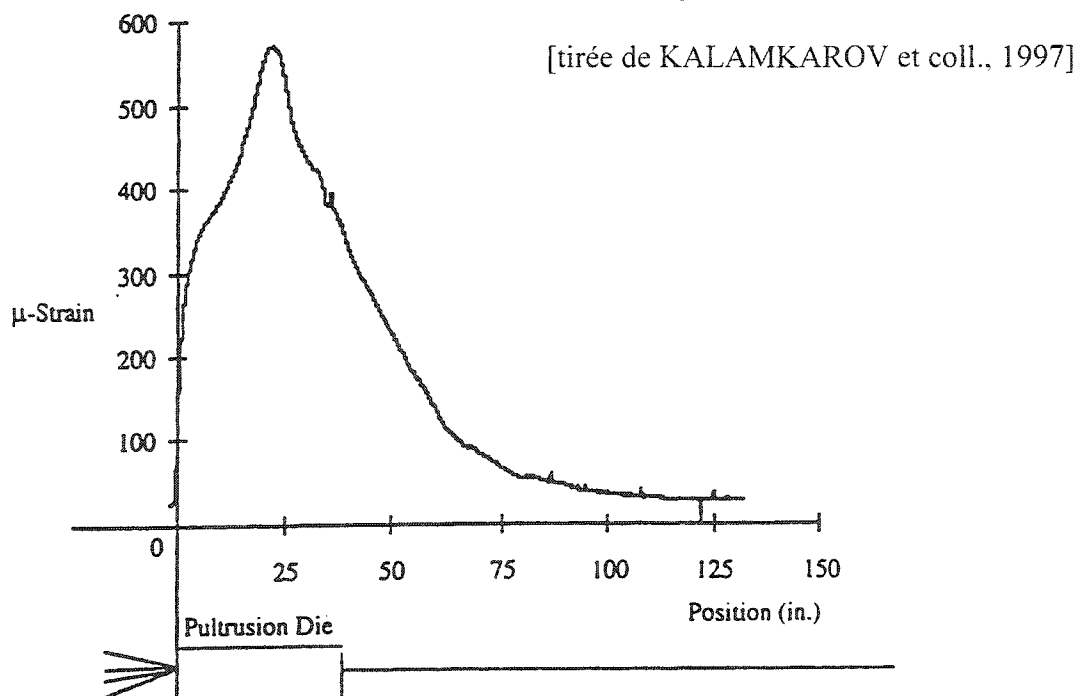
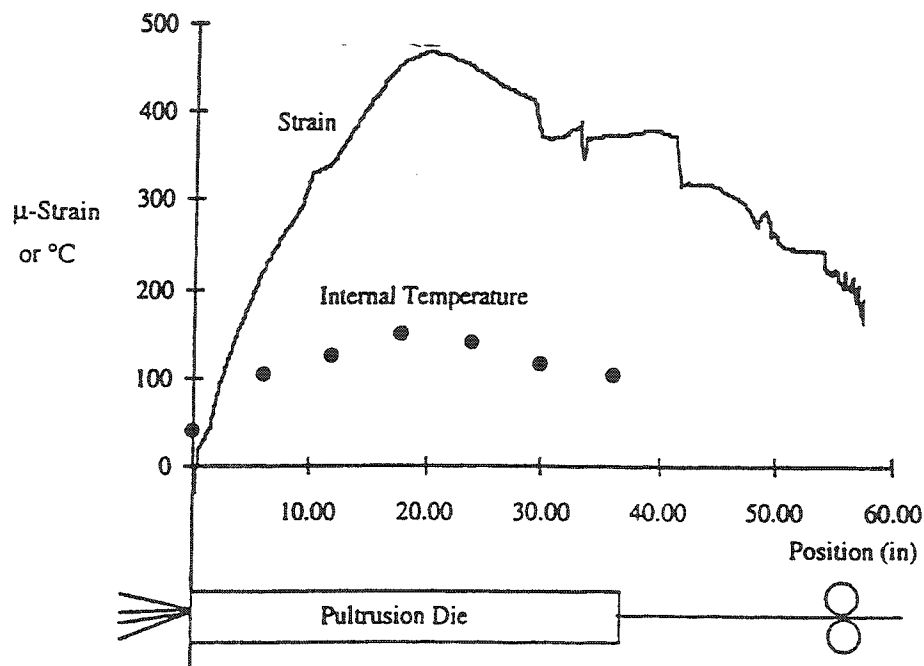


Figure 3.7 Réponse d'un capteur SFO au procédé de pultrusion avec fibres et avec augmentation de température mais sans résine

Finalement le procédé complet de pultrusion avec imprégnation des fibres avec de la résine thermodurcissable vinylester et mûrissement à haute température a été réalisé. Un thermocouple a été placé au centre de la section transversale et il précédait directement le premier capteur à fibre optique intégré. Les fibres de carbone ont donc été imprégnées de résine et le capteur à fibre optique a été inséré au milieu de la section transversale. La figure 3.8 présente les lectures recueillies par le capteur à fibre optique ainsi que les températures provenant du thermocouple en fonction de la position du capteur.



[tirée de KALAMKAROV et coll., 1997]

Figure 3.8 Réponse d'un capteur SFO au procédé complet de pultrusion

Le capteur avait franchi le système d'alimentation en fibres, la chambre de pultrusion et les jeux de roues lorsqu'il a cessé de fonctionner. Aucune raison évidente ne permettait alors d'expliquer pourquoi le capteur ne renvoyait plus de signal. Trois autres capteurs ont alors été intégrés et ont aussi été endommagés. Deux de ces capteurs ont cessé de fonctionner en franchissant l'entrée de

la chambre de pultrusion. Ils ont probablement été déviés de leur ligne et ensuite brisés par le compactage des fibres. Le quatrième capteur a par contre survécu aux mêmes étapes que le premier mais, comme celui-ci, il est devenu inopérant quelques minutes après sa sortie de la chambre de pultrusion. Les profils de déformations de ces deux capteurs sont semblables bien que le quatrième capteur montre des déformations plus importantes.

Une hypothèse avancée pour expliquer le bris des capteurs réside dans le phénomène de contraction radiale lors du refroidissement. En effet, des calculs tendent à montrer que la pression radiale sur les capteurs intégrés pourrait atteindre des valeurs aussi importante que 21 MPa lors du refroidissement. Une telle pression peut provoquer le bris du capteur.

Suite à ces essais infructueux, une méthode de renforcement a été appliquée à un capteur à fibre optique qui a été intégré dans une barre d'armature en PRFC. Cette méthode de renforcement offre une meilleure protection des capteurs à fibre optique et a permis d'obtenir un échantillon fonctionnel. Le graphique de la figure 3.9 illustre l'évolution du capteur protégé au cours du procédé de pultrusion. Les déformations observées sont beaucoup plus faibles dans ce cas comparées aux déformations obtenues avec les capteurs non protégés (courbe en partie supérieure du graphique de la figure 3.9). L'importante déformation négative après l'entrée du capteur dans la chambre de pultrusion est probablement due à une légère flexion de ce capteur renforcé. Les lectures demeurent par la suite constantes à environ $100 \mu\epsilon$ jusqu'à la moitié de la chambre de pultrusion pour ensuite revenir de façon graduelle vers la valeur initiale. À la sortie de la chambre de pultrusion, lorsque la barre entre en période de refroidissement, les lectures redeviennent négatives.

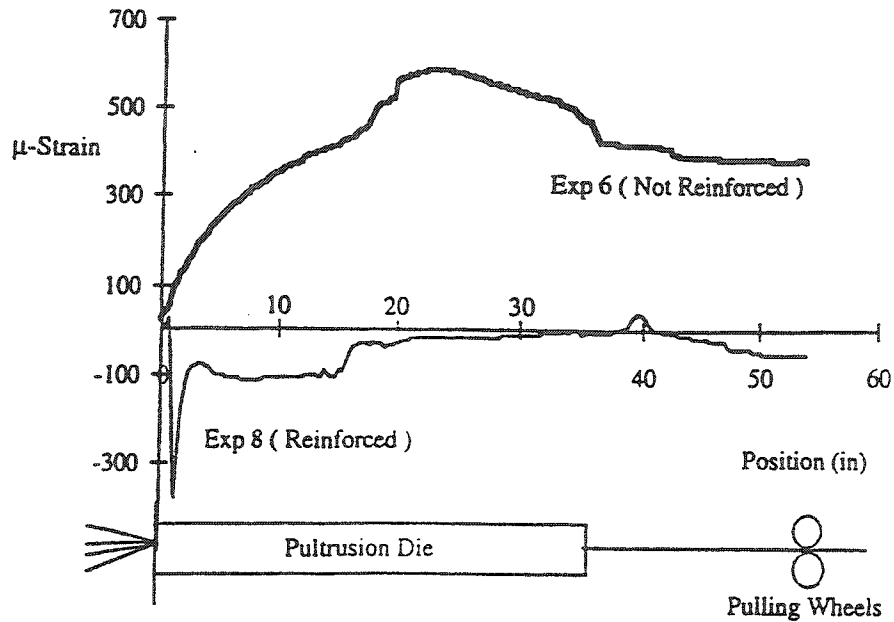


Figure 3.9 Réponse du capteur SFO protégé lors de son intégration

3.2.3 Gaines mécaniques protectrices

Il est évident que l'intégration des capteurs à fibre optique dans les matériaux composites nécessite l'utilisation de gaines mécaniques protégeant adéquatement ceux-ci, tout en permettant une bonne interaction entre le milieu hôte et les capteurs. Comme il a été mentionné au chapitre précédent, il existe plusieurs types de gaines mécaniques qui, la plupart, ont été développées pour des applications du domaine des télécommunications. Ces gaines ne sont donc pas toujours adaptées aux conditions qui prévalent lors de l'intégration des capteurs à fibre optique.

Les gaines mécaniques sont nécessaires pour plusieurs raisons. Premièrement, elles rendent la manipulation des capteurs à fibre optique beaucoup plus facile, car ceux-ci sont très fragiles lorsqu'ils ne sont pas recouverts d'une telle gaine. Les gaines mécaniques procurent une protection physique contre les dommages de surface (égratignures, abrasion, rayures, éclats, etc.) d'où la propagation de fissures peut s'initier et entraîner le bris de la fibre optique. Ces gaines aident aussi à empêcher les microcourbures, diminuent le phénomène d'atténuation et améliorent la résistance mécanique et la résistance à la fatigue. Deuxièmement, les gaines mécaniques protègent les fibres optiques d'un contact direct avec l'humidité, ce qui pourrait réduire significativement la durabilité des fibres optiques et des capteurs en particulier lorsqu'ils sont soumis à des déformations importantes [CARMEN et SENDECKYI, 1993]. Troisièmement, les gaines mécaniques forment une barrière face à différents agents agressifs comme une solution hautement alcaline (solution interstitielle contenue dans les pores du béton). Une étude réalisée sur plusieurs types de gaines protectrices immergées dans une solution alcaline ou introduites dans un matériau cimentaire [HABEL et coll., 1997] indique que ces gaines subissent toutes des changements de propriétés à divers degrés. L'étude portait sur des gaines en acrylate, en polyimide et en polymère fluoré et ce serait les gaines de polyimide qui, dans une solution alcaline, démontreraient un meilleur comportement.

L'intégration dans les matériaux composites est donc une opération favorisant une meilleure protection des capteurs à fibre optique puisque ceux-ci sont ainsi soustraits au contact direct avec la solution alcaline interstitielle du béton. Mais comme dans le béton, l'intégration de capteurs à fibre optique dans les PRF nécessite l'utilisation de gaines protectrices. Dans ce cas, ce n'est plus la solution alcaline qui pose problème, mais ce sont les conditions de température et de pression, lors de la fabrication, qui deviennent déterminantes. De plus, une fois l'intégration réalisée,

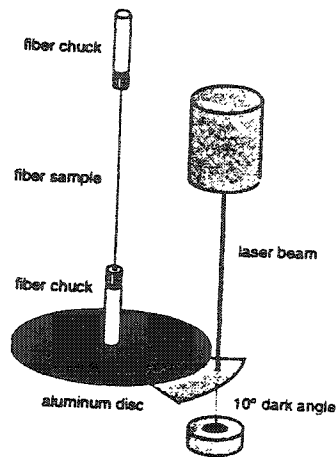
l'interface entre le capteur et le matériau hôte doit favoriser le transfert des contraintes et éviter les glissements qui viendraient fausser les résultats. Le capteur à fibre optique étant considéré comme une inclusion dans la matrice du PRF, ses caractéristiques géométriques (forme, longueur, diamètre) doivent faire en sorte qu'il ne devienne pas un point de faiblesse majeur de l'élément fabriqué. En prenant tous ces paramètres en considération, le choix du type de gaine mécanique protectrice devient donc très important.

Certains chercheurs ont étudié l'influence de gaines mécaniques pour la protection et le comportement des capteurs à fibre optique dans les PRF et parmi ceux-ci NELLEN et coll. (1998). Leur programme de recherche consistait à faire l'intégration de fibres optiques (monomodes et multimodes) et de capteurs à fibre optique à l'intérieur de barres d'armature en PRFV. Les barres d'armature utilisées ont été fabriquées avec des fibres de verre et de la résine époxy au moyen du procédé de pultrusion. Le diamètre de ces barres était de 8 mm. Les fibres optiques étaient intégrées parallèlement aux fibres de verre et étaient protégées par différents types de gaines mécaniques. La fabrication des tiges d'armature et l'intégration des fibres optiques ont été réalisées sur une machine de production industrielle où une température de cure maximale de la résine époxy de 200°C était appliquée.

La performance des différentes gaines a été évaluée au moyen de quatre méthodes soient: 1) l'inspection visuelle et au MEB¹ des échantillons après intégration, 2) la détermination de la viscosité et du module de cisaillement des gaines avec un pendule de torsion (figure 3.10), 3) la réalisation de tests d'enfoncement (figure 3.11) pour évaluer la résistance au glissement ou

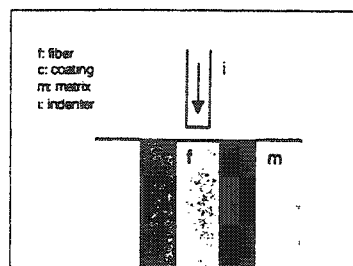
¹ Microscope électronique à balayage

adhérence des interfaces gaine/fibre optique et gaine/composite et 4) la comparaison de certains paramètres des capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg avant et après intégration.



[tirée de NELLEN et coll. 1998]

Figure 3.10 Schéma du pendule de torsion



[tirée de NELLEN et coll. 1998]

Figure 3.11 Schéma montrant le principe de l'essai d'enfoncement

Les gaines testées ainsi que quelques-unes de leurs caractéristiques sont présentées au tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 CARACTÉRISTIQUES DES GAINES MÉCANIQUES UTILISÉES LORS DE L'ÉTUDE DE NELLEN ET COLL., (1998)

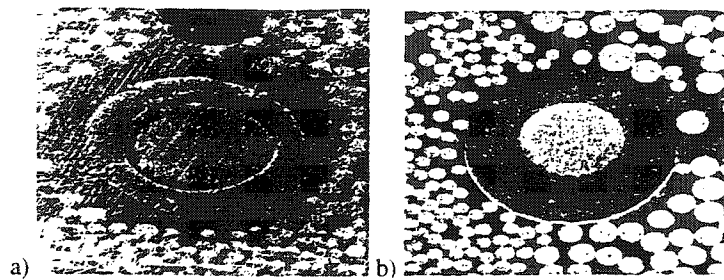
Nom	Type de gaine	Diamètre de la fibre optique	Épaisseur de la gaine
		μe	μe
A1	acrylique, couche double	125	63
A2	acrylique, couche double	125	63
A3	acrylique, couche simple	85	63
P1	polyimide	125	15
P2	Polyimide avec mince couche de carbone	125	15

Les principaux résultats obtenus et les conclusions tirées suite à cette étude sont résumés dans les paragraphes suivants.

L'examen visuel des barres d'armature intégrées a permis de remarquer que la fibre optique ne se retrouve pas toujours positionnée au milieu de la section de la barre. En plusieurs endroits, la fibre optique se retrouve près de la surface. Il est à noter qu'aucun équipement spécial n'a été utilisé pour le positionnement de la fibre optique.

Les gaines A1 et A2 avec une double couche d'acrylate se sont souvent avérées dégradées. Par contre, les gaines A3 en acrylate rigide et P1 et P2 en polyimide sont demeurées intactes. Ces détails ont été observés au microscope électronique à balayage et un exemple est présenté à la figure 3.12. Une des raisons proposées par les auteurs pour expliquer la dégradation des échantillons protégés avec les gaines A1 et A2 est la température élevée (200°C) du procédé de

pultrusion. En effet, une fibre optique avec une gaine d'acrylate ordinaire commence normalement à subir des dégradations à partir de 60°C. Par contre, une fibre optique protégée avec une gaine de polyimide peut supporter des températures allant jusqu'à 265°C. Une autre explication peut provenir du fait que les gaines d'acrylate A1 et A2 ont un plus faible module d'élasticité que les gaines A3, P1 et P2. Ainsi, lors de la préparation des échantillons, les gaines A1 et A2 ont pu être endommagées alors que les autres gaines, plus rigides, n'auraient pas subi de dommages.

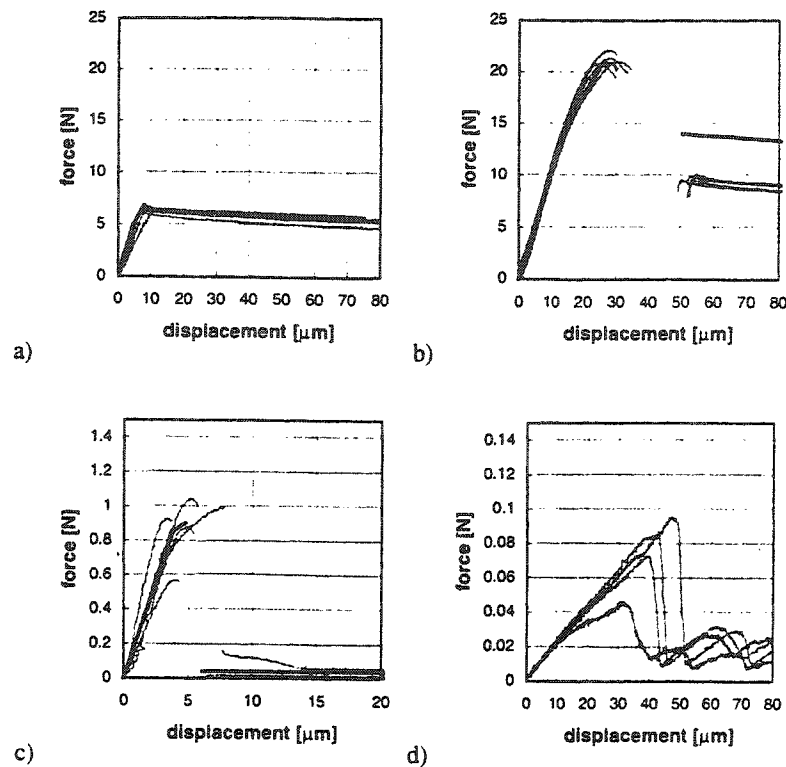


[tirée de NELLEN et coll. 1998]

Figure 3.12 Vue au MEB de fibres optiques A2 et A3 intégrées

Les essais effectués avec le pendule de torsion ont permis de caractériser le module de cisaillement et la viscosité des différentes gaines. Ces essais ont démontré que le module de cisaillement des gaines d'acrylate A1 et A2 est significativement inférieur à celui des gaines A3 et P2. Tandis que la viscosité des différentes gaines est plutôt du même ordre.

Au moyen des tests d'enfoncement, il a été possible de comparer les gaines mécaniques entre-elles du point de vue de la résistance au glissement. Les graphiques de la figure 3.13 présentent les résultats obtenus lors d'essais d'enfoncement sur des gaines a)P1, b)P2, c)A3 et d)A2.



[tirée de NELLEN et coll. 1998]

Figure 3.13 Essais d'enfoncement réalisés sur les gaines a)P1, b)P2, c)A3 et d)A2

La charge appliquée par le pointeur augmente jusqu'à ce que survienne le glissement d'une composante par rapport à une autre. Après le glissement engendré, la charge appliquée par le pointeur est la charge nécessaire pour vaincre les forces de friction. Celle-ci peut diminuer de façon linéaire (la longueur de friction diminuant à mesure que le glissement progresse) ou diminuer plus rapidement lorsque survient le phénomène d'abrasion (coefficient de friction non-uniforme durant le glissement). Il peut aussi être remarqué sur ces figures une courbe en gras. Cette courbe a été tracée d'après un modèle théorique dans lequel les valeurs moyennes des essais

d'enfoncement ont été insérées. Le graphique d) ne comporte pas une telle courbe en raison de la trop grande variabilité des résultats.

D'après les graphiques de la figure 3.13, les essais d'enfoncement démontrent qu'il existe une différence significative en ce qui a trait aux propriétés des interfaces des gaines en acrylate et en polyimide. Il est à noter que les graphiques ne comportent pas les mêmes échelles de sorte que ce sont les gaines de polyimide qui ont donné les meilleures performances du point de vue de l'adhérence. De plus, ces essais ont démontré que l'interface fibre optique/gaine mécanique était plus faible que l'interface gaine mécanique/matériau composite. Tous les essais d'enfoncement réalisés dans cette étude-ci ont mené à un glissement de la fibre optique à l'intérieur de sa gaine mécanique.

Vingt fibres optiques sur lesquelles un réseau de Bragg a été imprimé ont été intégrées dans le PRFV. L'intégration de ces capteurs a été réussie en tenant compte qu'un seul des vingt capteurs n'a pas survécu au procédé de fabrication des barres d'armature. Les dix-neuf autres capteurs sont demeurés fonctionnels. Il est à noter que les deux types de gaines, acrylate et polyimide, ont permis une protection adéquate des capteurs, observation basée sur le simple fait que ceux-ci ont survécu au procédé de pultrusion. Une atténuation qualifiée d'acceptable ($< 0,11$ dB/m) a été mesurée sur les fibres optiques multimodes et une atténuation négligeable a été mesurée sur les fibres optiques monomodes qui sont beaucoup moins sensibles aux microcourbures. Le patron de réflexion n'a pas été modifié quant à sa forme, mais les réseaux de Bragg ont montré des déformations axiales résiduelles après leur intégration. Ces déformations résiduelles varient dans un intervalle compris entre $-100\text{ }\mu\epsilon$ et $+400\text{ }\mu\epsilon$ et dont la moyenne est de $+150\text{ }\mu\epsilon$. L'explication

de cette valeur positive des déformations résiduelles résiderait, selon les auteurs, dans le fait que les coefficients d'expansion thermique des fibres et de la matrice sont différents.

3.3 Instrumentation de structures au moyen des capteurs à fibre optique

La gestion des infrastructures et la recherche du rendement optimal pour chaque dollar investi par les différents propriétaires de ces structures urbaines ont ouvert la voie au développement de technologies permettant l'évaluation et le suivi à long terme de ces ouvrages. Des structures touchées par cette nouvelle tendance, les ouvrages d'art sont certainement celles bénéficiant présentement du plus fort engouement. Les gestionnaires ont besoin, pour prendre des décisions éclairées, de renseignements et de données sur le comportement immédiat et sur celui à long terme des infrastructures placées sous leur responsabilité. Ces renseignements deviennent encore plus importants lorsque des nouveaux matériaux comme les polymères renforcés de fibres (PRF) sont utilisés comme armature de renforcement dans ces structures.

Au cours des dernières années, quelques structures ont été instrumentées avec des capteurs à fibre optique ainsi qu'avec d'autres instruments de mesure. Un des objectifs poursuivis était bien sûr de démontrer, au moyen d'applications pratiques, la performance de ces nouveaux capteurs dans des structures réelles. Cette portion du rapport présente quatre cas d'ouvrage d'art pour lesquels une instrumentation comprenant des capteurs à fibre optique a été développée. Ces applications sont : le Stork Bridge à Winterthur en Suisse, le Taylor Bridge près de Winnipeg au Manitoba, le Sungsan Bridge en Corée et le Salmon River Bridge en Nouvelle-Écosse.

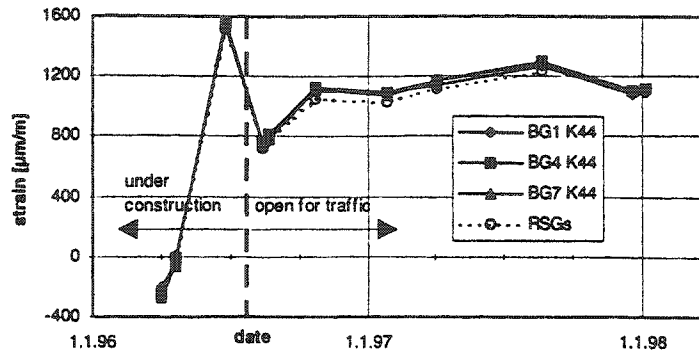
3.3.1 Stork Bridge en Suisse [SENNHAUSER et coll., 1998]

Au cours de l'année 1996, l'ancien pont Stork (Stork Bridge) à Winterthur en Suisse a été remplacé par une nouvelle structure qui est un pont à haubans. Cet ouvrage est constitué de douze paires de câbles dont onze paires en acier et une paire en polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC). Dans le but de suivre le comportement de ces deux câbles en PRFC, divers instruments de mesure ont été utilisés. Chacun des deux câbles est équipé d'une série de 7 capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg et de jauges électriques. De plus, des jauges de température et d'humidité font aussi partie de la stratégie d'instrumentation pour connaître les conditions d'exposition des câbles.

Les câbles de PRFC, arrangés selon une structure hexagonale, ont une longueur de 35 mètres et sont constitués de 241 torons de 5 mm de diamètre. Des sept capteurs à fibre optique (réseaux de Bragg) utilisés, quatre servent de témoin pour la compensation thermique et la dérive à long terme. Ils ont été placés sur des parties de câbles témoins d'une longueur de 30 cm qui ne sont pas soumis à des efforts structuraux. Deux de ces capteurs ont été fixés avec une pré-déformation d'environ $2\,500\ \mu\epsilon$. Les trois autres capteurs sont fixés directement aux câbles pour la mesure des déformations engendrées par les efforts agissant sur ces éléments.

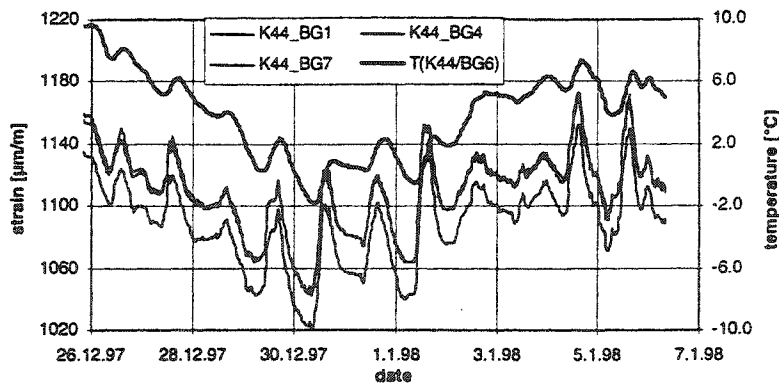
La figure 3.14 présente le suivi des déformations des câbles pendant la construction et après l'ouverture du pont à la circulation. Les résultats s'échelonnent sur une période d'environ vingt mois, et montrent une bonne corrélation entre les jauges résistives et les capteurs à fibre optique. De plus, comme il était prévu, les déformations enregistrées sur les câbles en PRFC sont fortement dépendantes de la température étant donné la différence entre le coefficient de

dilatation thermique de ce type de matériau et celui de l'acier ($\alpha_{\text{acier}} \gg \alpha_{\text{PRFC}}$). En effet, une diminution de température induit une contraction dans les câbles d'acier et, par le fait même, une diminution de contraintes dans les câbles de PRFC. Les profils de températures et de déformations présentés à la figure 3.15 illustrent bien ce phénomène.



[tirée de SENNHAUSER et coll., 1998]

Figure 3.14 Déformations enregistrées avec les capteurs à fibre optique (BG1, BG4 et BG7) et avec une jauge électrique



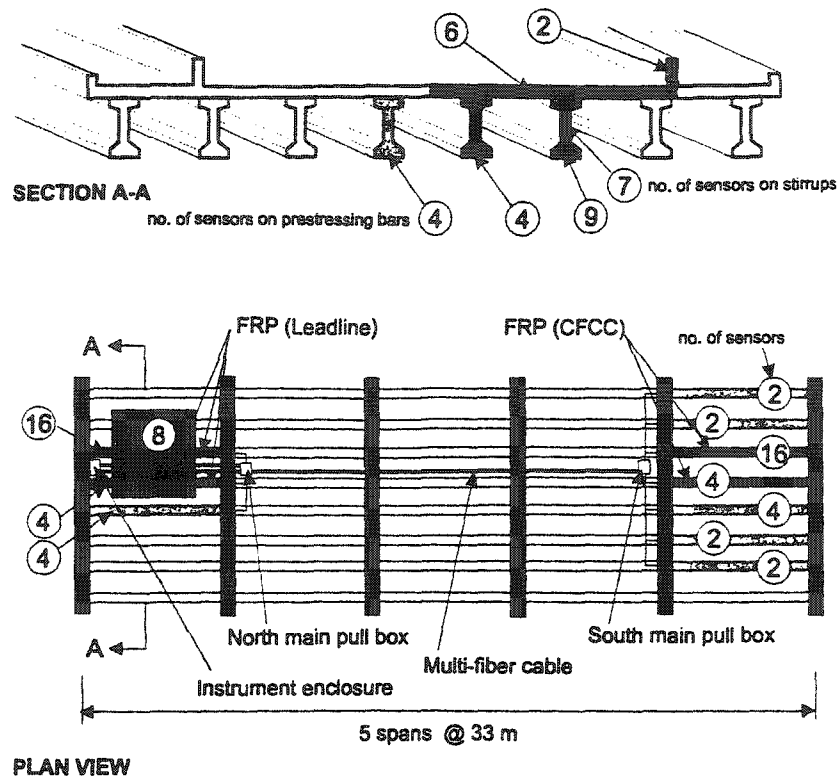
[tirée de SENNHAUSER et coll., 1998]

Figure 3.15 Profils de déformations (BG1, BG4 et BG7) et de températures (BG5) enregistrés avec les capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique utilisés comme témoin, en particulier ceux ayant une pré-déformation initiale, sont suivis afin de vérifier la possibilité d'un décollement entre la résine époxy et la structure. Un décollement du capteur serait alors indiqué par un saut dans les déformations enregistrées.

3.3.2 Taylor Bridge au Manitoba, Canada [MAASKANT et coll., 1998]

Une deuxième application des capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg utilisés comme instruments de mesure dans un ouvrage d'art est le pont Taylor (Taylor Bridge) situé près de Winnipeg au Manitoba. Le pont Taylor qui comporte deux voies, traverse la rivière Assiniboine et est constitué de cinq portées (33 mètres chacune). Chacune d'elle est soutenue au moyen de huit poutres en béton précontraint. Le pont a une longueur totale de 165 mètres et une largeur de 9,6 mètres. Un total de 65 capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg sont présentement en opération pour suivre le comportement du renforcement en matériaux composites utilisé lors de ce projet. En effet, deux des cinq portées de ce pont sont renforcées et précontraintes, en partie, avec des polymères renforcés de fibres de carbone. On retrouve des PRFC dans quatre poutres principales et à l'intérieur du tablier. Les chasse-roues, quant à eux, sont armés avec des polymères renforcés de fibres de verre (PRFV). Le schéma de la figure 3.16 illustre ces détails ainsi que l'emplacement des réseaux de Bragg.



[tirée de MAASKANT et coll., 1998]

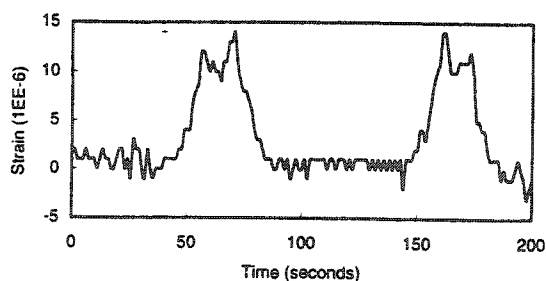
Figure 3.16 Schéma du Taylor Bridge présentant l'emplacement des capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique sont fixés sur des barres d'armature en acier et en PRF ainsi que sur des câbles de précontrainte et des étriers. De manière à tenir compte du phénomène de déformation thermique apparente, des capteurs de température ont aussi été installés à diverses profondeurs dans les poutres et dans le tablier.

Les capteurs Bragg sont montés selon un réseau dit "en parallèle" dans lequel chacun des capteurs possède sa propre fibre optique ou son propre lien avec l'appareil de mesure. À l'opposé des réseaux en parallèle, il existe des réseaux en série ou multiplexés, pour lequel il y a plusieurs

capteurs partageant la même fibre optique. L'option d'un réseau de capteurs en série peut s'avérer intéressante dans certains cas, mais ces avantages peuvent être annulés à cause de certaines considérations dont voici une brève liste: bris de la fibre qui entraîne la perte de tous les capteurs situés en amont du bris, bris d'un capteur (qui est la partie la plus fragile de l'instrument) qui peut entraîner le mauvais fonctionnement ou la perte des autres capteurs, l'inaccessibilité de la fibre optique après le bétonnage pour la réparation, la gaine mécanique discontinue créant des points de faiblesse et rendant les manipulations plus difficiles et situations où les capteurs ne sont pas tous positionnés sur la même barre d'armature (disposition non-rectiligne).

Quelques résultats préliminaires ont été obtenus lors d'un test de chargement effectué avec un camion-remorque. L'essai consistait à suivre, au moyen des capteurs à fibre optique, le passage à faible vitesse du camion et de sa remorque sur la portée nord de l'ouvrage. La figure 3.17 montre les déformations enregistrées par un capteur à fibre optique fixé au milieu du tendon de précontrainte d'une poutre principale.



[tirée de MAASKANT et coll., 1998]

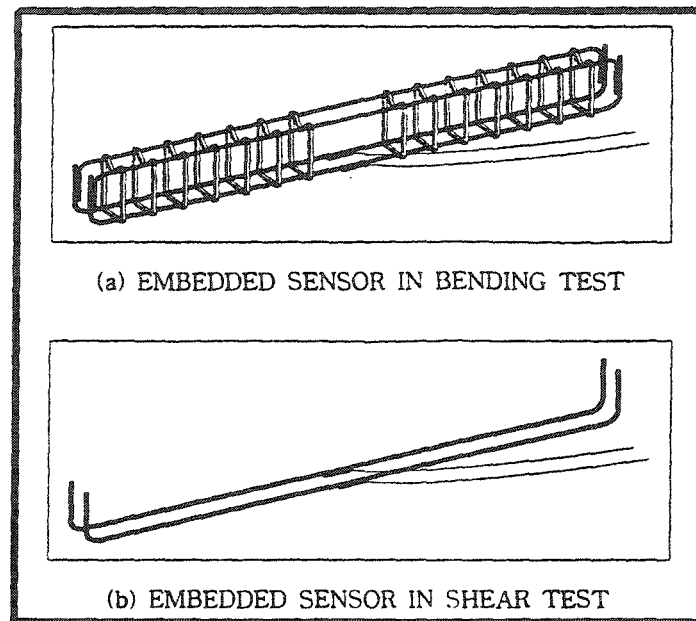
Figure 3.17 Déformations enregistrées par un capteur à fibre optique lors du passage d'un camion-remorque

Le graphique permet de distinguer le passage du camion du passage de la remorque. En effet, le camion étant plus lourd que la remorque, il provoque une déformation plus grande que celle-ci. Le premier passage illustré sur ce graphique est un passage en marche arrière. Le premier maximum correspond à l'essieu de la remorque et le deuxième maximum correspond au camion. Par la suite, un passage en marche avant a été effectué et le troisième maximum correspond, cette fois-ci, au camion alors que le quatrième est relié à la remorque. Ces résultats préliminaires permettent de constater que les capteurs à fibre optique de type réseau de Bragg permettent l'instrumentation et le suivi de structures de génie civil.

3.3.3 Sungsan Bridge en Corée [KIM et PAIK, 1997]

Le pont Sungsan, situé en Corée, est un des ponts les plus longs de ce pays. Il a été instrumenté avec des capteurs à fibre optique intrinsèques de type Fabry-Pérot. Préalablement à l'instrumentation de cette structure, des essais de laboratoire ont été effectués pour valider le comportement des capteurs employés.

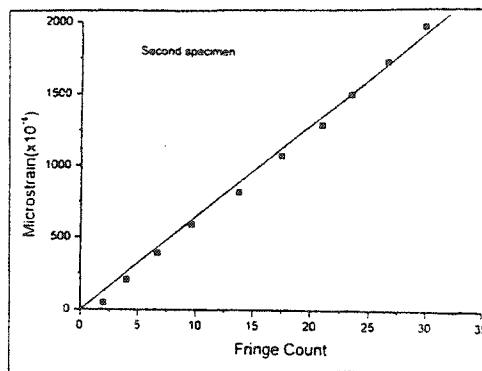
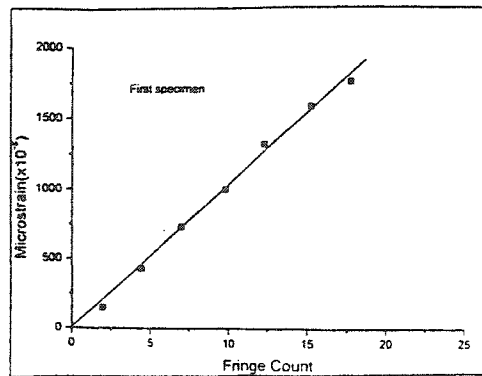
Les essais de laboratoire ont été menés sur des poutres de béton armé de 20*20*150 cm (figure 3.18). Les capteurs à fibre optique intrinsèques Fabry-Pérot et les jauges électriques ont été fixés aux barres d'armature en acier. Des essais de flexion quatre points ont été effectués sur ces poutres. Deux modes de rupture étaient recherchés soient des ruptures en flexion (poutres avec étriers) et des ruptures en cisaillement (poutres sans étriers).



[tirée de KIM et PAIK, 1997]

Figure 3.18 Emplacement des capteurs à fibre optique sur l'armature des poutres pour les essais de flexion (a) et les essais de cisaillement (b)

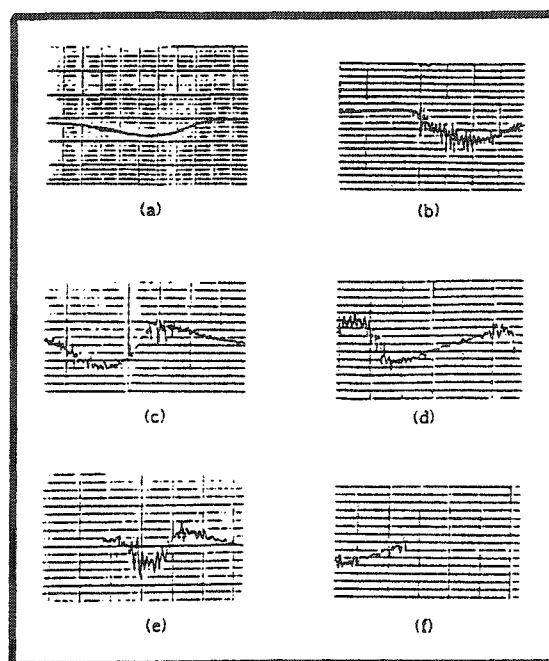
La figure 3.19 présente les résultats d'un essai sur des poutres avec étriers. Les lectures provenant des capteurs à fibre optique sont en abscisse et les résultats provenant des jauges électriques en ordonnée. Ce graphique démontre la bonne linéarité entre les deux types de jauges.



[tirée de KIM et PAIK, 1997]

Figure 3.19 Déformations enregistrées par les jauges électriques en fonction du nombre de franges enregistrées par un capteur à fibre optique

Suite aux essais de laboratoire, l'instrumentation du Sungsan Bridge a été réalisée avec le même type de capteurs. Les capteurs sont fixés à mi-portée des poutres maîtresses en acier et sont positionnés sur trois portées différentes. Quelques autres instruments de mesure font partie de ce projet dont des jauges électriques, des jauges d'accélération et de déflexion. Les essais menés sur ce pont consistent en des chargements statiques et dynamiques appliqués grâce à un camion de 30 tonnes. Les résultats obtenus des chargements statiques montrent que ces capteurs possèdent une grande résolution ($0.12 \mu\epsilon$). Les résultats dynamiques, quant à eux, montrent la tendance que prennent les déformations au niveau du pont lorsque la vitesse du camion varie comme il est illustré à la figure 3.20.

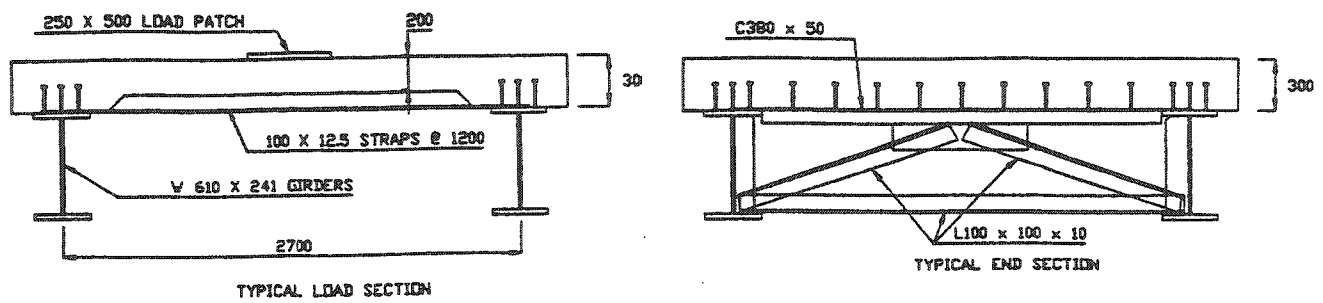


[tirée de KIM et PAIK, 1997]

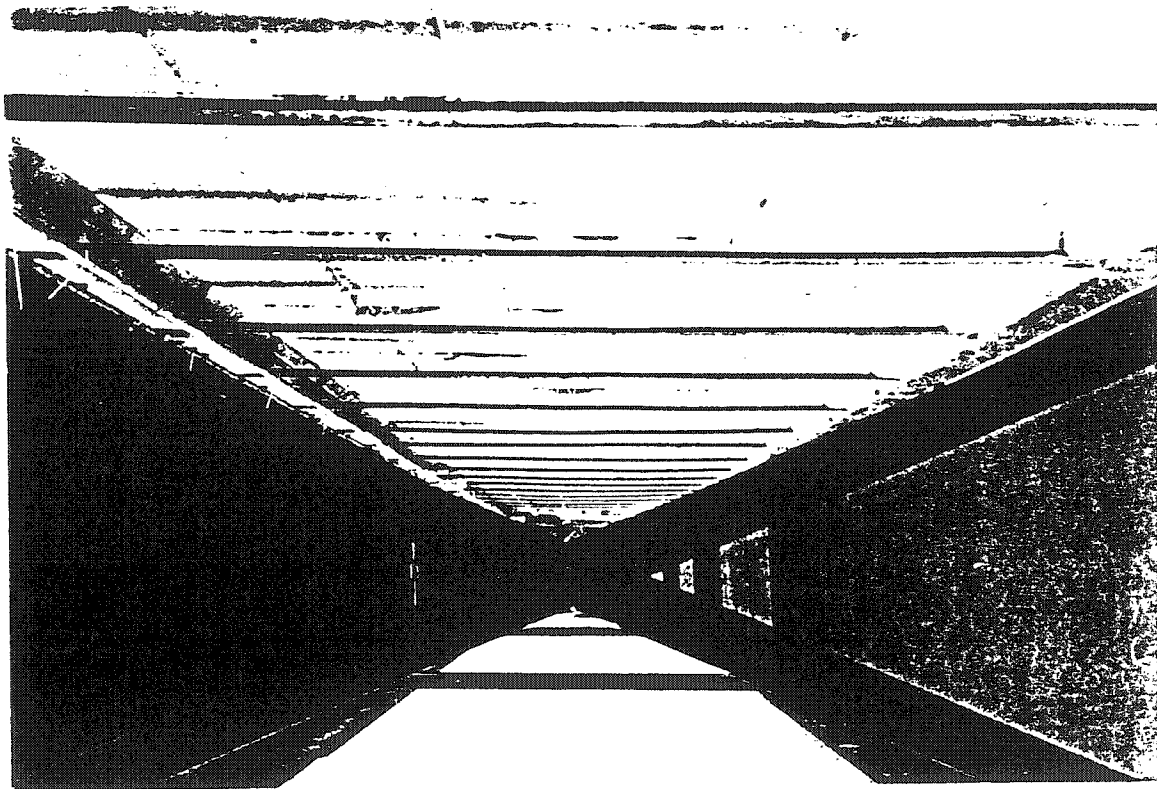
Figure 3.20 Profils de déformation enregistrés par un capteur à fibre optique lors du passage d'un camion à a) 30 km/h. b) 40 km/h. c) 50km/h. d) 60 km/h. e) 70 km/h et f) 80 km/h

3.3.4 Salmon River Bridge en Nouvelle-Écosse, Canada [Newhook et coll., 1996; Newhook et Mufti, 1996; Doncaster, 1997]

Le Salmon River Bridge est situé sur l'autoroute 104 (transcanadienne) à Kemptown en Nouvelle-Écosse. Son caractère particulier réside dans le fait que son tablier en béton ne contient aucune armature en acier. Un système innovateur de courroies en acier (figures 3.21a et 3.21b) sous-jacentes au tablier ainsi qu'une armature constituée de polymères renforcés de fibre (PRF) remplacent le renforcement en acier traditionnel. Ce pont a été ouvert à la circulation le 5 décembre 1995.



(a)

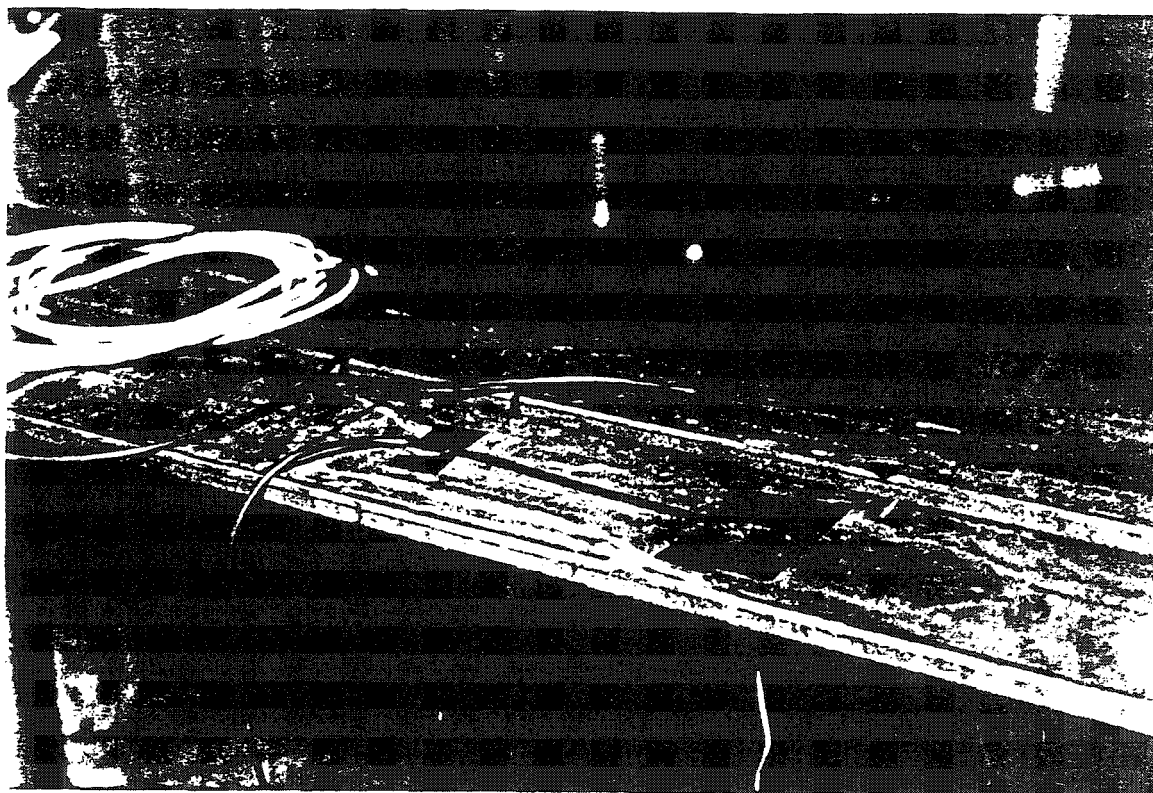


(b)

[Tirée de Newhook et Mufti. 1996 et Doncaster. 1997]

Figure 3.21 a) Schéma du système innovateur du Salmon River Bridge
b) Système de courroies en acier placé sous le tablier du pont

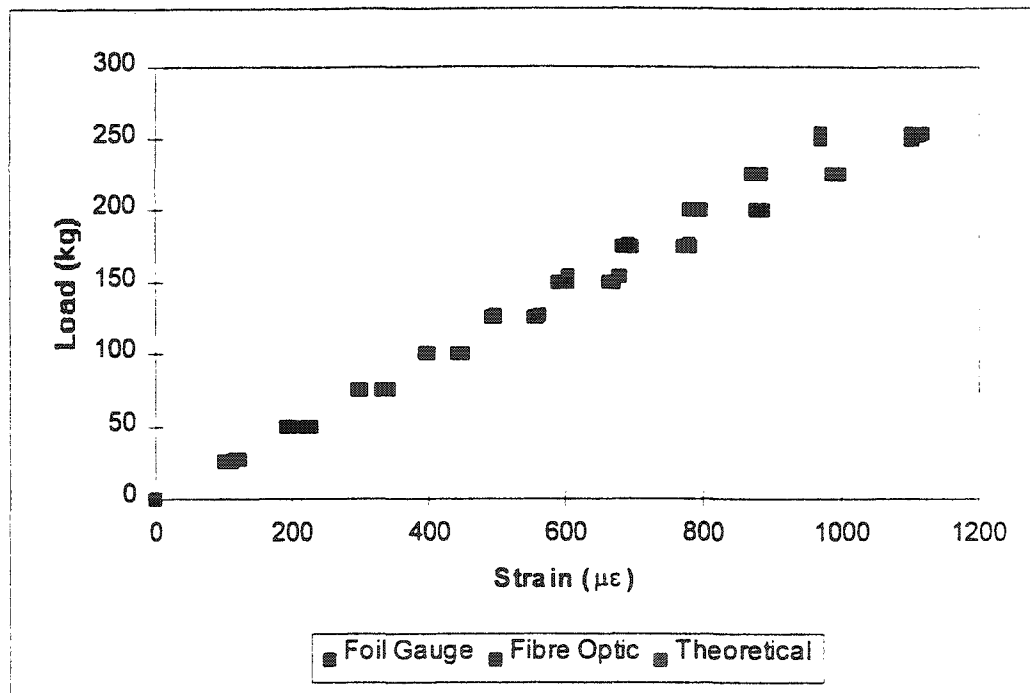
Dans le cadre de ce projet, des essais de laboratoire sur des modèles grandeur-réelle ont été effectués. Ces modèles ont été fabriqués dans les laboratoires de structure de la Technical University of Nova Scotia. Ces modèles étaient principalement composés de deux poutres maîtresses en acier, de neuf courroies d'acier transversales soudées sur les semelles des deux poutres et d'un tablier de béton d'une épaisseur de 200 mm, armé avec des PRF. Préalablement à l'installation des courroies sur un des modèles, des essais de flexion quatre points ont été effectués sur deux de ces courroies. Les courroies testées ont une longueur de 3 mètres et une section de $101.6 \times 12.7 \text{ mm}^2$. Chacune d'elles a été instrumentée, en son milieu, avec un capteur à fibre optique de type réseau de Bragg et une jauge électrique (figure 3.22).



[Tirée de Doncaster, 1997]

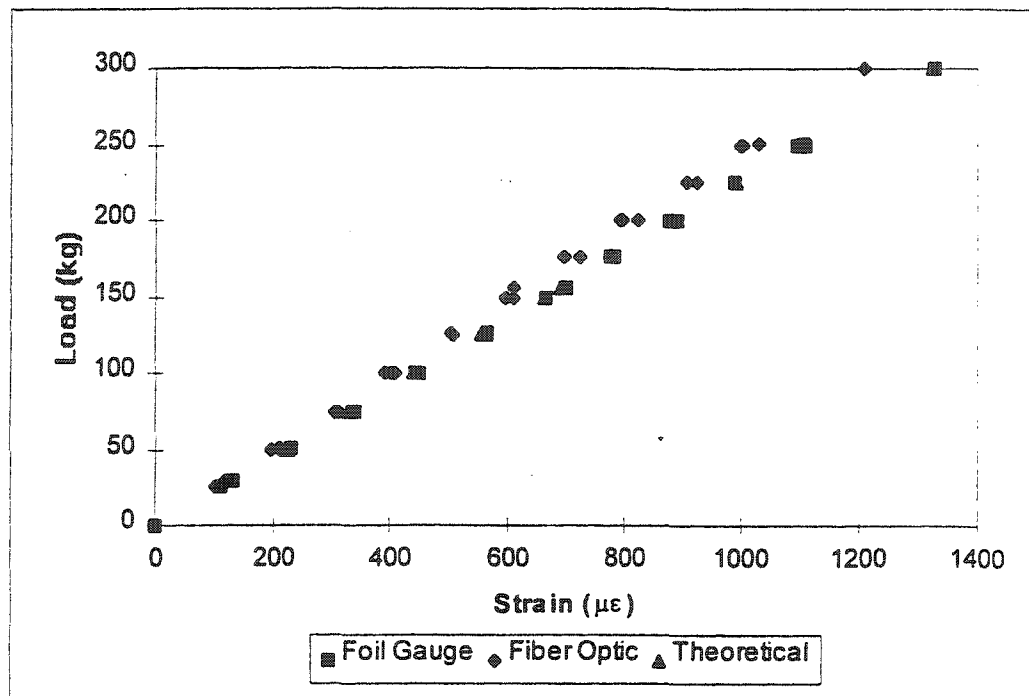
Figure 3.22 Courroies d'acier instrumentées avec des capteurs à fibre optique et des jauges électriques

Les jauges électriques et les capteurs à fibre optique étaient fixés sur des faces opposées. Les courroies pouvaient être retournées de manière à pouvoir observer le comportement des capteurs en traction et en compression. Les figures 3.23 et 3.24 présentent respectivement la superposition des résultats obtenus avec les jauges électriques et les capteurs à fibre optique lors d'un essai de traction et d'un essai de compression effectués sur une des deux courroies.



[Tirée de Doncaster, 1997]

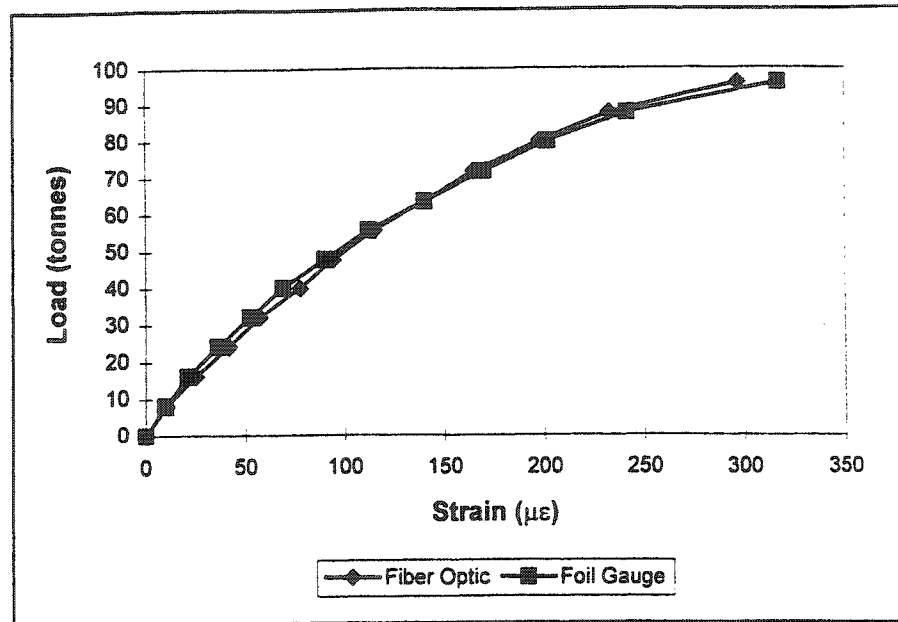
Figure 3.23 Essai de traction réalisé sur une courroie d'acier



[Tirée de Doncaster, 1997]

Figure 3.24 Essai de compression réalisé sur une courroie d'acier

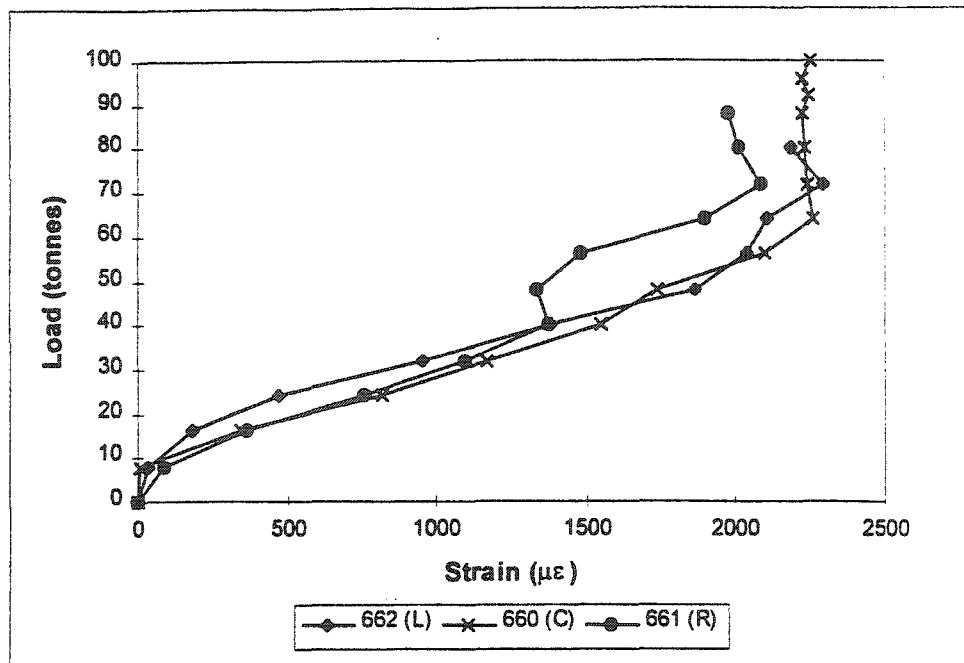
Suite à ces essais, un modèle grandeur-réelle a été fabriqué et les deux courroies y ont été fixées de manière à ce que les capteurs à fibre optique soient en tension lors des chargements. Des résultats provenant des capteurs à fibre optique ont été obtenus pour deux chargements appliqués au centre de ce modèle: un chargement de 835 kN et le chargement de 1118 kN qui a conduit à la rupture par poinçonnement. La figure 3.25 présente les lectures prises lors du chargement de rupture pour une des deux courroies en acier. Il est à noter que la dernière lecture enregistrée ne correspond pas à la charge de rupture, mais à une charge inférieure (941 kN).



[Tirée de Doncaster, 1997]

Figure 3.25 Chargement de rupture d'une courroie en acier

Trois réseaux de Bragg ont aussi été noyés dans le béton du tablier d'un autre modèle grandeur-réelle. Les capteurs n'étant pas fabriqués pour cette application particulière, ils ont dû être collés, avec de la résine époxy, sur une barre d'armature en acier. Une fois fixés sur la barre d'acier et dûment protégés, les capteurs ont été positionnés dans le coffrage et enfouis lors du bétonnage. La figure 3.26 présente les résultats obtenus lors des différents tests de poinçonnement effectués près de chacun des capteurs.

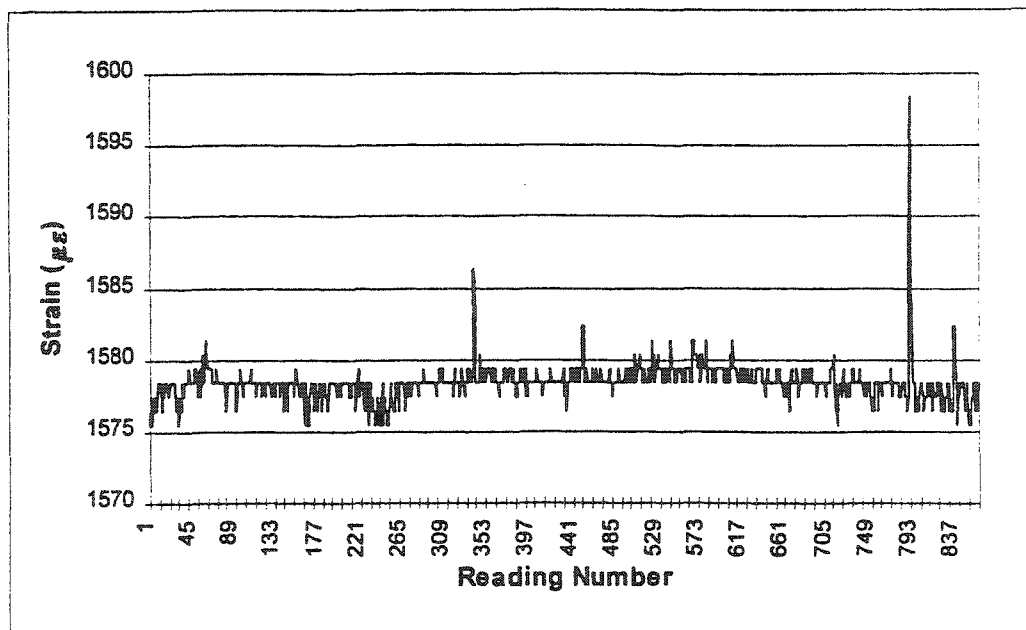


[Tirée de Doncaster, 1997]

Figure 3.26 Résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique lors des tests de poinçonnement

Les trois capteurs fournissent un patron de déformation semblable. Le bris des trois capteurs est survenu dans un intervalle compris entre 1 900 et 2 300 $\mu\epsilon$. Ces bris sont probablement causés par l'importante déformation des barres d'armature en acier lorsque soumises au poinçonnement.

Après les essais de laboratoire sur les modèles grandeur-réelle, des capteurs à fibre optique du même type ont été installés sur le Salmon River Bridge. Deux de ces capteurs ont été intégrés dans un treillis en PRFV (Nefmac) et un autre soudé à une courroie en acier. La figure 3.27 présente l'acquisition de données sur une période d'environ cinq minutes de la jauge à fibre optique soudée sur la face inférieure d'une courroie d'acier.



[Tirée de Doncaster, 1997]

Figure 3.27 Acquisition de données réalisée avec un capteur à fibre optique

Sur ce graphique, les déformations sont données en fonction d'un nombre de lectures puisque le poste de lecture ne permettait pas d'afficher le temps. La fréquence d'acquisition était de 3 Hz, donc les résultats ne doivent servir qu'à estimer l'amplitude des déformations [DONCASTER, 1997].

3.4 Lien entre les essais et les applications en génie civil et le programme expérimental

Le chapitre 3 se voulait une revue bibliographique de certains essais et applications réalisés avec les capteurs à fibre optique dans le domaine du génie civil au cours des dernières années. Ces essais et applications ont touché trois principaux champs: les essais de laboratoire, l'intégration dans les PRF et l'instrumentation de structures réelles. Ce choix a été fait dans le but d'énoncer l'état des connaissances dans ces trois champs avant la réalisation de la présente étude car celle-ci porte sur ces mêmes sujets. Le programme expérimental qui fait l'objet du chapitre suivant (chapitre 4) est donc composé d'une phase essais de laboratoire, suivi d'une phase intégration de capteurs dans les PRF et se termine par une phase instrumentation d'une structure réelle.

4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Tel qu'introduit au chapitre précédent, le programme expérimental est composé de trois phases distinctes. La première phase est composée des manipulations et essais réalisés en laboratoire afin de se familiariser avec cette nouvelle technologie et d'établir les limites d'utilisation des capteurs à fibre optique. La deuxième phase est constituée des expérimentations réalisées en industrie sur l'intégration des capteurs à fibre optique. Cette étape nécessitait une certaine connaissance du comportement des capteurs qui a été acquise lors de la première phase. La deuxième phase s'est déroulée en deux étapes soient l'intégration des capteurs à fibre optique dans des barres d'armature de PRFV et l'intégration dans un treillis d'armature en PRFC. La troisième et dernière phase a consisté en l'application des connaissances et techniques acquises précédemment afin de réaliser l'instrumentation d'une structure réelle.

4.1 Essais de laboratoire

4.1.1 Objectifs

Les essais de laboratoire ont été réalisés dans le but de vérifier la possibilité d'utiliser les capteurs à fibre optique SFO avec différents matériaux tels les polymères renforcés de fibres (PRF de verre, de carbone et d'aramide), l'acier et le béton. Ils ont aussi été effectués pour tenter d'identifier le comportement, les limites d'utilisation et la performance de ces capteurs lorsqu'ils sont utilisés avec les matériaux nommer précédemment. Le développement de techniques de manipulation et de collage efficaces permettant un rendement adéquat des capteurs faisait aussi partie des objectifs identifiés pour la partie touchant les essais de laboratoire.

4.1.2 Manipulations et collage des capteurs à fibre optique

Les premières manipulations sur les capteurs à fibre optique ont été celles réalisées afin de procéder au collage de ces capteurs sur les différents matériaux énumérés plus haut. Selon les matériaux, la préparation de la surface a été quelque peu différente. Les surfaces d'acier ont été traitées de manière conventionnelle, c'est-à-dire: meulage et sablage de la surface afin d'éliminer les crénelures et la couche d'oxyde de fer jusqu'à l'obtention d'une surface lisse et nettoyage de la surface avec un jet d'air sous pression et avec de l'acétone suivi d'un produit anti-acide (*conditioner*) et d'un produit neutralisant les alcalins (*neutralizer*).

En ce qui a trait aux surfaces de béton, la première étape a consisté en un sablage pour éliminer les déformations de surface. Afin d'uniformiser la surface et de remplir les pores du béton, une mince couche de résine époxy à prise rapide a été appliquée localement, là où le capteur devait être collé. Cette résine a par la suite été sablée et nettoyée avec un jet d'air sous pression et avec de l'acétone.

Les PRF ont, quant à eux, été préparés selon les étapes suivantes: les déformations de surface ont été éliminées par limage et l'obtention d'une surface lisse et uniforme a été possible en procédant à un sablage localisé. Le nettoyage a été complété avec un jet d'air sous pression et avec de l'acétone. Trois techniques de collage ont été expérimentées lors de cette partie des travaux pour fixer les capteurs à fibre optique sur les différentes surfaces.

La première technique qui a été expérimentée est celle décrite dans la section 3 de "Installation Procedure" du fascicule intitulé "Sensoptic Fiber-Optic Sensors, Fabry-Pérot Strain Gage, Model:

SFO-FP. Instruction Manuel" fourni par Roctest Ltée [ROCTEST, 1997]. Certains problèmes d'alignement de la fibre optique ont été rencontrés, en particulier lors de l'étape 5 (step 5) au moment d'appliquer un ruban adhésif sur la région sensible du capteur pour assurer un bon contact entre celui-ci et la surface hôte. De plus, lors de cette manipulation particulière, il est facile d'engendrer la formation de bulles d'air dans la résine époxy et ainsi réduire la qualité du lien entre la surface hôte et le capteur.

Une deuxième approche a donc été expérimentée dans le but d'éviter les difficultés rencontrées précédemment. Cette approche consiste à coller la fibre optique sur un ruban adhésif de type Mylar (ruban adhésif ayant la propriété de ne pas s'étirer ou se déformer) pour assurer la linéarité. Par la suite la résine époxy est étendue sur la surface hôte et le ruban adhésif Mylar, sur lequel est collée la fibre optique, est rabattu par dessus la résine époxy. Une légère pression est appliquée sur le ruban Mylar de manière à expulser l'excédent de résine époxy. Ces manipulations sont fortement inspirées de ce qui est pratiqué lors de la pose de jauges électriques conventionnelles. Malgré l'atteinte d'une excellente linéarité et l'absence de vides d'air, cette méthode peut facilement provoquer une variation de l'intensité du signal et l'induction de contraintes dans le capteur. Les risques d'endommagement du capteur sont donc beaucoup plus élevés.

La troisième technique expérimentée et qui s'est avérée être la plus adéquate est celle décrite dans le document intitulé "Installation of Optical Fiber Sensors" réalisé par ISIS Canada (Innovations en Structures avec Systèmes de détection Intégrés) membre du réseau canadien de centres d'excellence [ISIS Canada]. La particularité de cette technique consiste à créer une rainure au moyen de deux lanières de ruban adhésif espacées d'environ 2 mm, d'appliquer la résine époxy

dans cette rainure et finalement d'y insérer la fibre optique. Les capteurs à fibre optique ayant servi lors des essais de laboratoire ont donc été fixés selon cette procédure.

4.1.3 Essais thermiques

Trois capteurs à fibre optique dont deux de type SFO et un de type EFO ont été placés dans des enceintes permettant de faire varier la température entre -20 et + 70 °C. Les capteurs seuls étaient ainsi soumis à des variations de température afin d'observer leur comportement. Ces manipulations ont été la première étape des essais thermiques.

Par la suite des capteurs à fibre optique de type SFO ont été fixés à plusieurs type de matériaux au moyen de résine époxy et ont été soumis à des variations de température du même ordre de grandeur que celles décrites au paragraphe précédent. Cinq de ces capteurs ont été placés dans une chambre réfrigérante lors de la deuxième étape des essais thermiques. Après ceci, quatre capteurs ont été testés dans la chambre chaude lors de la troisième étape.

Les capteurs employés au cours des essais thermiques ainsi que les matériaux sur lesquels ils ont été fixés sont énumérés au tableau 4.1. La figure 4.1 montre quelques-uns de ces échantillons soumis aux essais thermiques.

TABLEAU 4.1 ESSAIS THERMIQUES

Étapes	No du capteur	Élément structural	Type de matériau
1 ^{ère} étape (capteurs seuls)	100 0720	---	---
	100 1401	---	---
	100 3020*	---	---
2 ^e étape (chambre froide)	100 1405	Tendon d'ancrage	PRFA
	100 1347	Barre d'armature crénelée	Acier
	100 0730	Éprouvette cylindrique	Béton
	100 1473	Barre d'armature lisse	PRFV
	100 1398	Barre d'armature lisse	PRFV
3 ^e étape (chambre chaude)	100 1525	Barre d'armature crénelée	Acier
	100 0670	Éprouvette cylindrique	Béton
	100 1473	Barre d'armature lisse	PRFV
	100 1287	Barre d'armature lisse	PRFV

* Seul capteur de type EFO employé lors des essais thermiques. Tous les autres capteurs sont de type SFO.

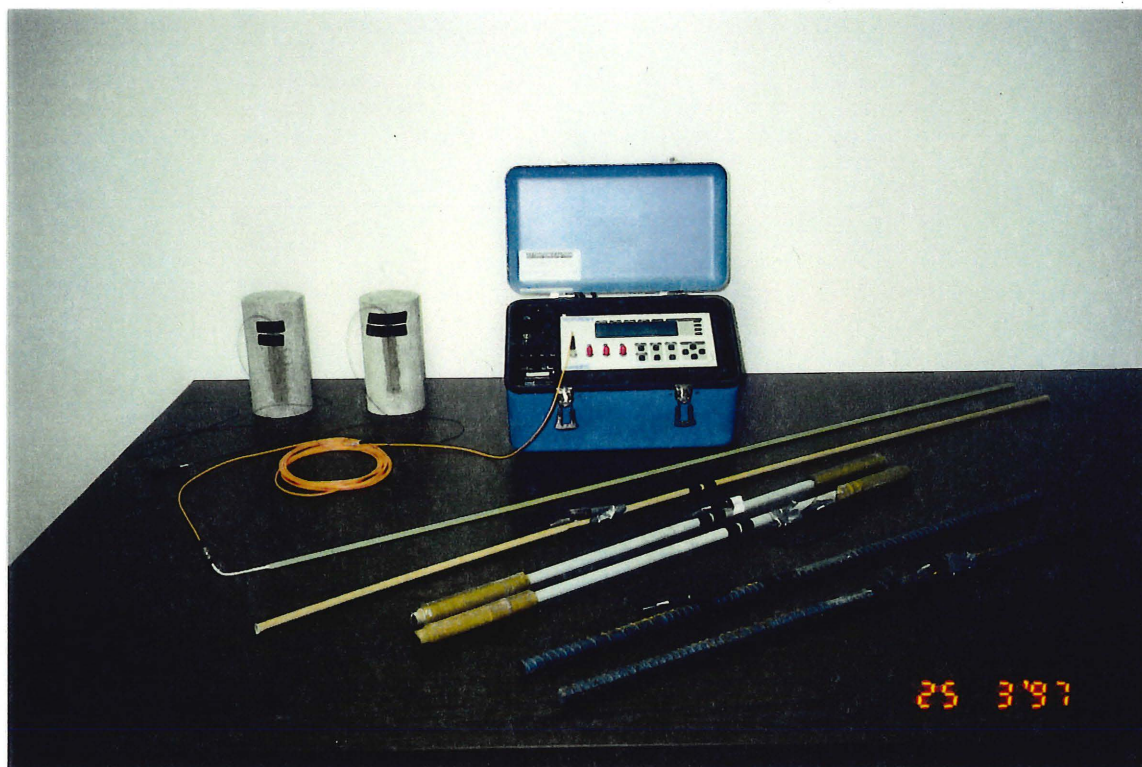


Figure 4.1 Échantillons soumis aux essais thermiques

4.1.4 Essais mécaniques

Des essais de traction ont été réalisés sur différents types d'armature sur lesquels des capteurs à fibre optique de type SFO ont été fixés au moyen de résine époxy. Les armatures qui ont été employées pour ces essais sont des barres en acier et en PRFV (figure 4.2) ainsi que des échantillons provenant d'une portion d'un treillis en PRFC. La figure 4.3 présente le montage utilisé avec un de ces échantillons. Des jauges électriques et un autre type de capteur à fibre optique (réseau de Bragg) ont été employés sur certaines de ces armatures afin de comparer les résultats entre-eux. Aussi, un cylindre de béton instrumenté en surface avec un capteur à fibre optique a été testé en compression. Le tableau 4.2 présente les échantillons mis à l'essai avec leur instrumentation respective.



Figure 4.2 Barres d'armature en acier et en PRFV soumises aux essais de traction

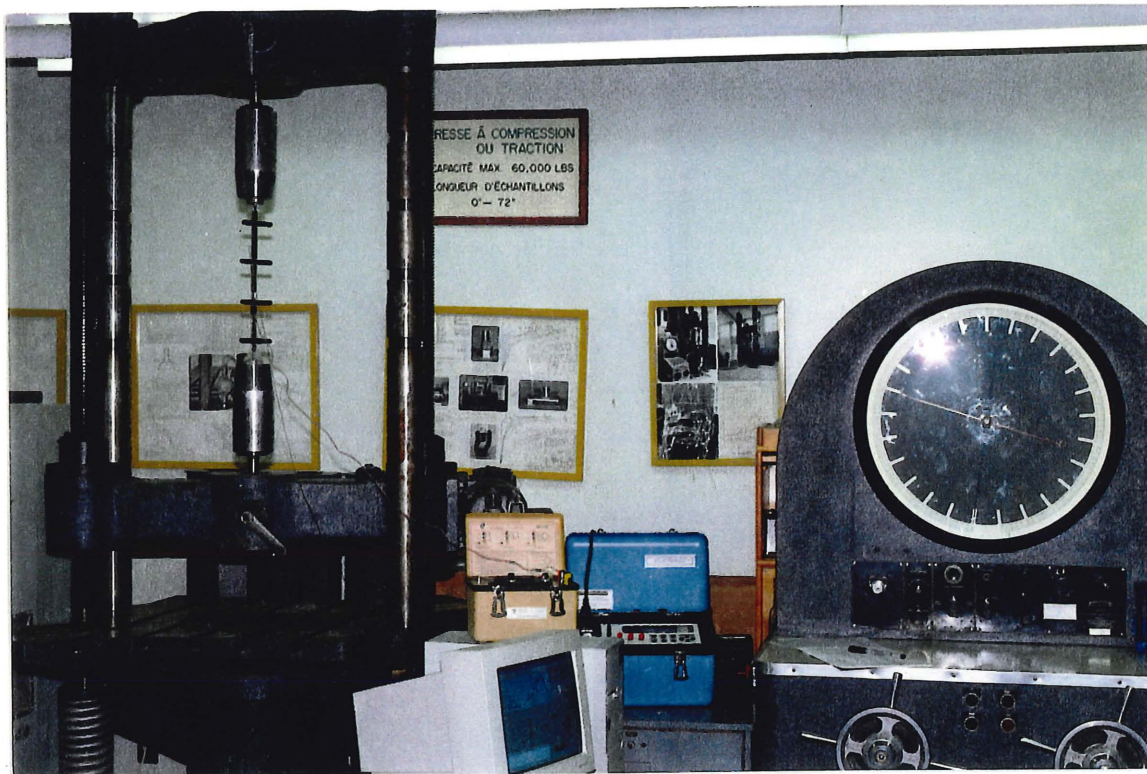


Figure 4.3 Montage utilisé pour les essais de traction

TABEAU 4.2 ESSAIS MÉCANIQUES

No du capteur	Élément structural	Type de matériau	Instrumentation
100 1473	Barre d'armature lisse	PRFV	SFO
100 1218	Barre d'armature lisse	PRFV	SFO
100 1272	Barre d'armature lisse	PRFV	SFO
100 1236	Barre d'armature lisse	PRFV	SFO et J.E.
100 1216	Barre d'armature crénelée	PRFV	SFO et J.E.
100 1264	Barre d'armature crénelée	PRFV	SFO et J.E.
100 0720	Barre d'armature crénelée	PRFV	SFO et Bragg
100 1401	Barre d'armature crénelée	Acier	SFO et Bragg
100 1295	Barre d'armature crénelée	Acier	SFO et J.E.
100 1287	Barre d'armature crénelée	Acier	SFO et J.E.
100 1382	Treillis d'armature	PRFC	SFO et J.E.
100 1376	Treillis d'armature	PRFC	SFO et J.E.
100 0730	Éprouvette cylindrique	Béton	SFO

N.B.: L'abréviation J.E. est utilisée pour désigner les jauges électriques.

4.1.5 Dalle armée avec un treillis en PRFC Nefmac C19

Dans le but d'étudier le comportement à court, moyen et long terme des armatures en PRFC Nefmac C19 devant être utilisées comme renforcement dans le tablier du pont Joffre, une dalle armée avec ce matériau composite a été fabriquée et testée dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke (figure 4.4). Cette dalle de 3,3 m de longueur par 1,0 m de largeur par 0,250 m de hauteur a été instrumentée de deux capteurs à fibre optique SFO collés directement sur le treillis d'armature, de deux capteurs à fibre optique EFO noyés dans le béton, de huit jauges électriques collées sur l'armature et d'un thermocouple inséré au cœur de la dalle. La figure 4.5 montre l'emplacement de ces instruments. De plus, d'autres instruments de mesure, situés à l'extérieur de la dalle, complètent les jauges situées dans le béton. Cette instrumentation externe consiste en un LVDT pour la mesure de la déflexion, des jauges de déformation électriques et des fissuromètres.

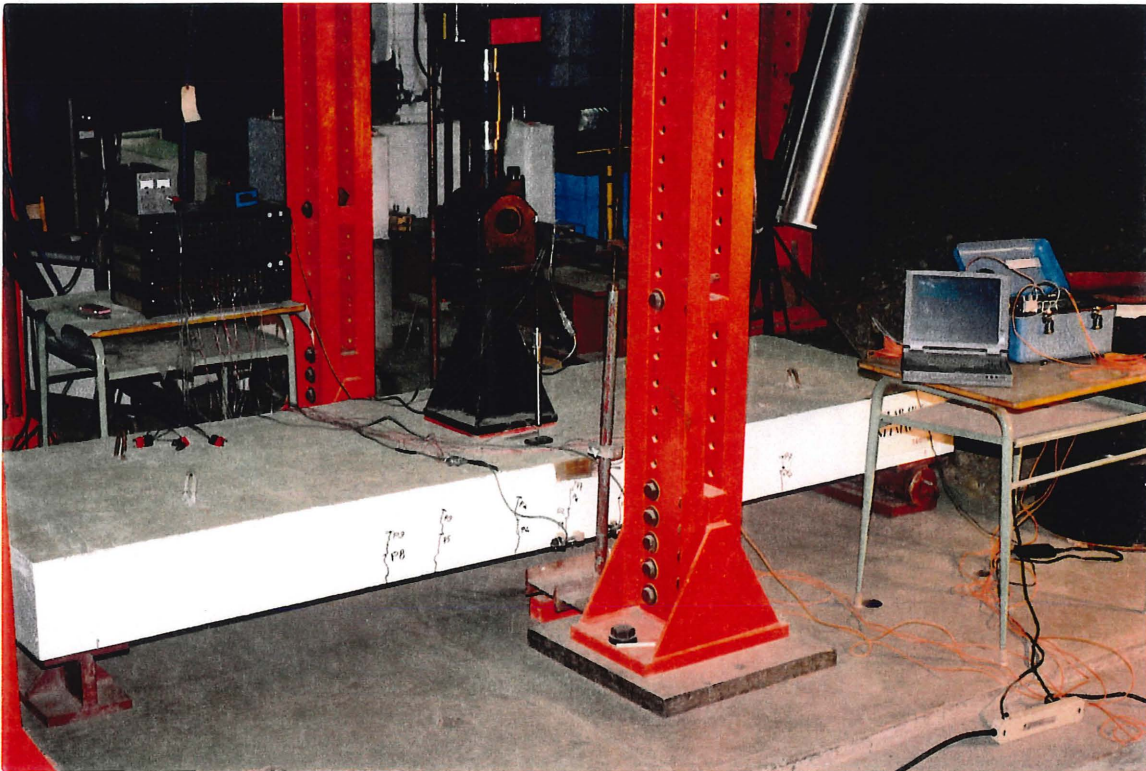


Figure 4.4 Montage réalisé pour les essais de chargements cycliques

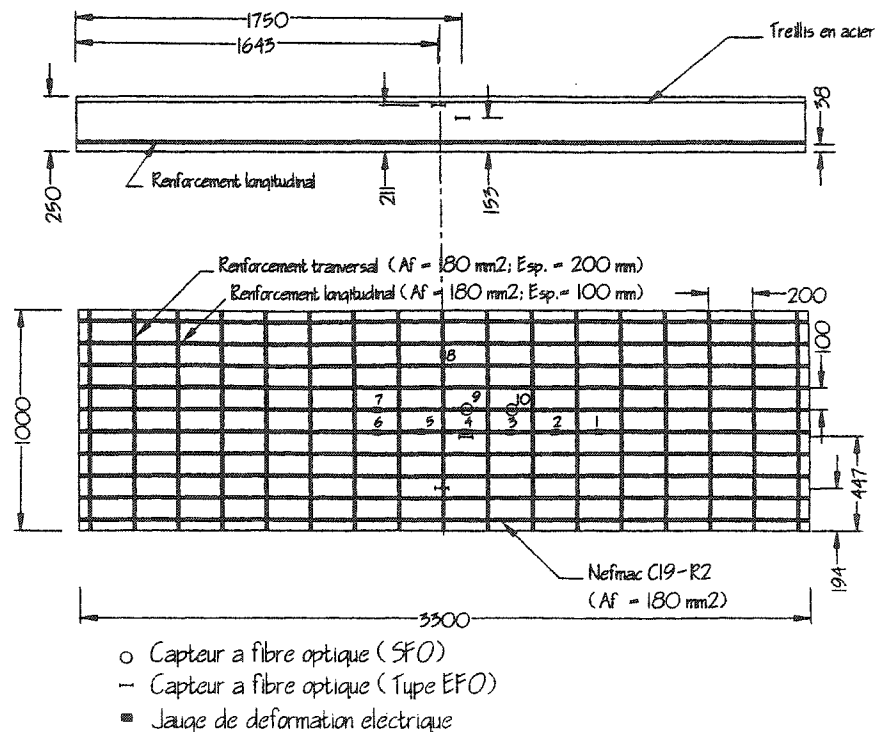


Figure 4.5 Schéma présentant la position des capteurs à fibre optique et des jauges électriques utilisés pour l'instrumentation de la dalle

Les étapes ayant fait l'objet d'une attention particulière sont les premiers 24 heures du mûrissement du béton, les trois chargements statiques exécutés préalablement aux chargements cycliques et finalement les chargements cycliques. Il est à noter qu'il y a eu quatre millions de cycles de chargement et que les deux premiers millions de cycles ont été effectués à une fréquence de 2 Hertz alors que les deux autres millions ont été réalisés à une fréquence de 3 Hertz.

Un système d'acquisition de données a fonctionné pendant toute la durée de l'essai et a recueilli des lectures provenant du LVDT du vérin, des fissuromètres et des jauges électriques. Le suivi des jauges à fibre optique a été fait, à intervalles réguliers, en reliant le poste de lecture à un

ordinateur portable. Chacune des quatre jauges à fibre optique était ainsi interrogée sur une période de dix secondes à raison de 100 lectures/seconde. Seulement les résultats concernant les capteurs à fibre optique sont présentés au chapitre suivant. Les autres résultats ne sont pas présentés dans ce document. Les manipulations réalisées pour la pose des capteurs à fibre optique et des jauges électriques sur le treillis Nefmac C19 dans le cas de la dalle sont similaires à celles réalisées pour l'armature du pont Joffre et elles sont décrites plus loin.

4.2 Intégration en industrie dans des barres d'armature en PRFV

4.2.1 Objectif

L'objectif de l'étude était de vérifier la possibilité d'intégrer de manière simple des capteurs à fibre optique extrinsèques de type Fabry-Pérot dans des barres d'armature en PRFV fabriquées au moyen du procédé de pultrusion. Les essais réalisés avaient pour but d'identifier les caractéristiques pouvant avoir de l'influence sur le comportement des capteurs et sur leurs performances.

4.2.2 Démarche expérimentale

L'expérimentation a été réalisée en industrie sur une machine de production commerciale, donc en présence de toutes les contraintes que cela implique. Le procédé de fabrication utilisé était la pultrusion. Ce procédé est couramment utilisé dans l'industrie des PRF notamment à cause de son taux de production élevé. Le partenaire industriel était la compagnie Pultrall inc. de Thetford Mines.

Les éléments fabriqués étaient des tiges en PRFV. Les fibres de verre étaient de type E et la résine employée était une résine de type vinylester. La température maximale dans la chambre de pultrusion, qui faisait environ 90 cm de longueur, était légèrement inférieure à 200°C (380°F). La vitesse de production (taux de production) était la même que lors d'une séquence normale soit d'environ 0,9 à 1,0 mètre/minute et elle demeurait évidemment constante tout au long des essais. De manière générale, la démarche réalisée lors d'une expérimentation consistait à introduire manuellement un capteur à fibre optique au milieu des fibres de verre et ceci, avant leur entrée dans la chambre de pultrusion (figure 4.6). Ce capteur était alors entraîné avec les fibres de verre et la résine dans la chambre de pultrusion et il en ressortait intégré à l'intérieur de l'élément fabriqué.

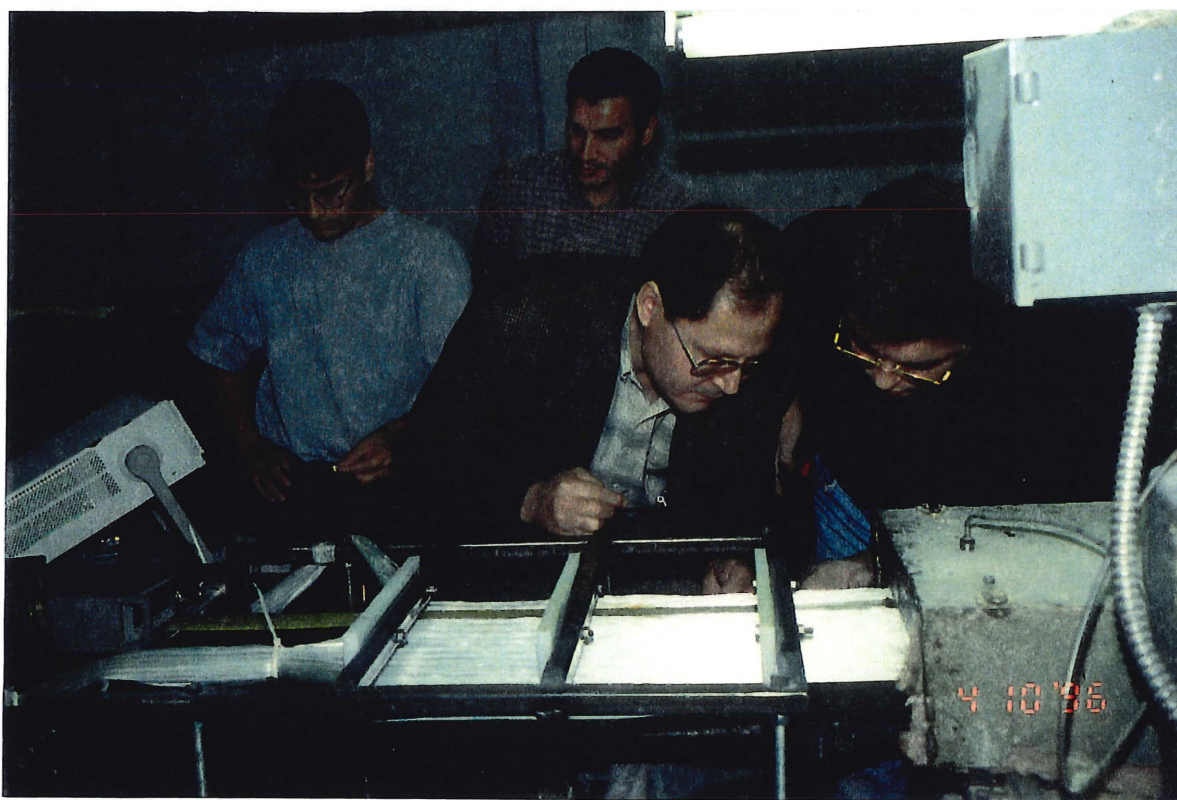


Figure 4.6 Intégration d'un capteur SFO à l'entrée de la chambre de pultrusion

L'expérimentation a été réalisée en quatre étapes qui correspondent chacune à une visite en industrie. À chacune des étapes, une série de capteurs étaient spécialement fabriqués pour les besoins précis des essais à exécuter et aussi en prenant en considération les résultats de l'expérimentation antérieure.

4.3 Intégration en industrie dans un treillis d'armature en PRFC

4.3.1 Objectif

Le but de la visite à l'usine de fabrication de la compagnie Industrial Composites de Toronto (Ont.), était d'intégrer six jauges de déformation à fibre optique SFO dans deux treillis de PRFC Nefmac C19 (treillis LS7 et LS8). Le schéma de ces deux treillis ainsi que la position des capteurs SFO sont présentés à la figure B.2. Ces treillis ont été instrumentés en vue de faire partie de l'armature supérieure du tablier du pont Joffre à Sherbrooke.

4.3.2 Détail du procédé de fabrication des treillis Nefmac

Le procédé de fabrication des treillis d'armature en PRF Nefmac peut être décrit comme une superposition de plusieurs couches longitudinales et transversales de fibres (généralement fibres de carbone ou de verre) imprégnées de résine qui produisent un treillis avec des mailles de forme rectangulaire.

Les équipements nécessaires pour la fabrication des treillis en PRF Nefmac sont : une table pivotante de grandes dimensions (ici 3.60*2,30m) sur laquelle sont fixés des crochets en

périphérie, un bain de résine pour imprégner les fibres et un système d'alimentation en fibres pouvant être constitué d'une étagère sur laquelle repose les bobines de fibres et d'un chariot dévideur, monté sur des rails, qui permet un mouvement de va-et-vient. Les figures 4.7 et 4.8 montrent les installations de la compagnie Industrial Composites en banlieue de Toronto où sont fabriqués les treillis en PRF Nefmac.

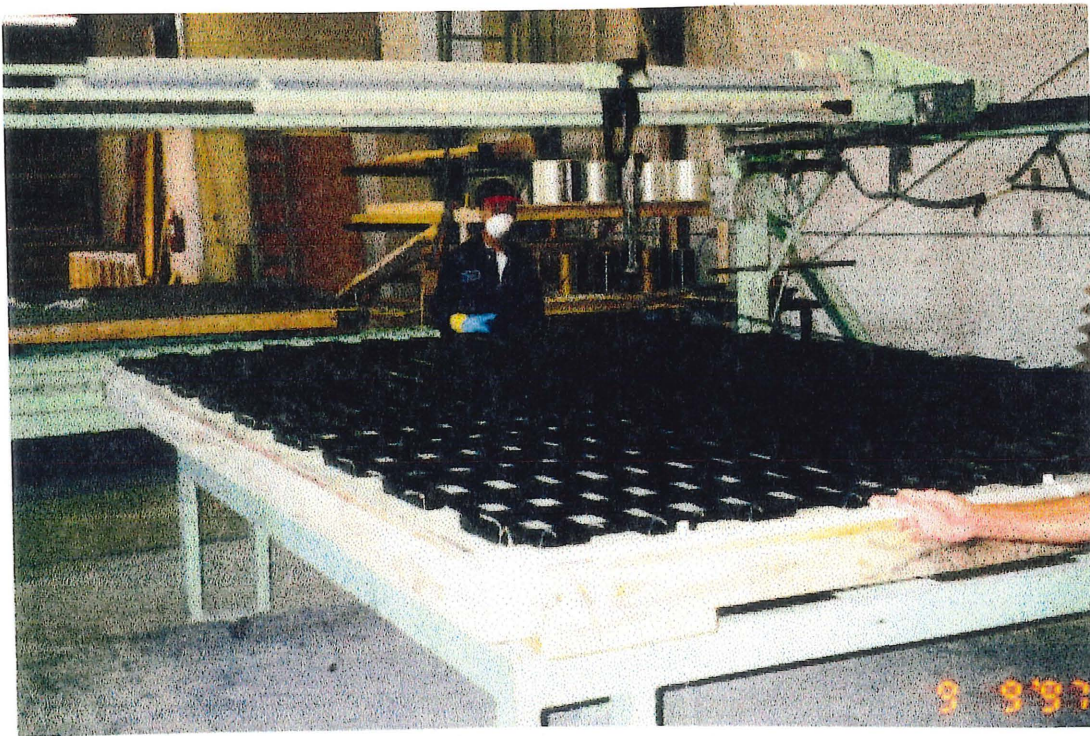


Figure 4.7 Équipements nécessaires à la fabrication d'un treillis Nefmac



Figure 4.8 Fabrication d'un treillis Nefmac en fibres de carbone

Les bobines de fibres reposent sur une étagère, située tout près du bain de résine. Le nombre de bobines utilisées dépend de la grosseur du treillis à fabriquer. Plus le treillis est gros, plus le nombre de bobines alimentant le système est important. La fabrication d'un PRFC Nefmac C19 nécessite huit bobines dont chacune fournit un toron constitué de plusieurs fibres de carbone. Les huit torons regroupés ensemble forment une couche.

Cette couche de fibres (huit torons pour un Nefmac C19), qui est préalablement imprégnée de résine, est attachée à un crochet situé dans un des coins de la table pivotante. Le chariot dévideur est mis en marche et il se déplace longitudinalement vers l'autre côté de la table. Ce mouvement induit une certaine tension dans la couche de fibres à cause du frottement des fibres le long du système d'imprégnation de résine et le long du système d'acheminement des fibres vers le chariot

dévideur. Cette tension permet aux fibres de se positionner de manière rectiligne sur toute la longueur de la table. Une fois arrivé de l'autre côté de la table, le chariot dévideur effectue un court arrêt pour permettre à l'opérateur situé à cet endroit de faire passer la couche de fibres autour de deux crochets. Le chariot dévideur repart par la suite vers son extrémité d'origine où un autre opérateur fait, lui aussi, passer la couche de fibres autour des deux crochets suivants. L'opération nécessite donc deux opérateurs qui sont situés de part et d'autre de la table. Lorsque la première passe dans le sens longitudinal est terminée, la table subit une rotation de 90° de manière à faire la juxtaposition d'une couche de fibres transversale. Les figures 4.9 et 4.10 schématisent le procédé de fabrication expliqué précédemment.

Tout au cours du procédé de fabrication, il faut s'assurer qu'il y ait toujours un certain niveau de résine dans le bain de manière à ce que les fibres soient toujours bien imprégnées. De plus, lorsqu'une bobine se vide complètement, les opérateurs doivent attacher le brin de la nouvelle bobine à celui de la bobine vide pour assurer la continuité dans les fibres et ne pas créer une zone de faiblesse. Lorsque ceci se produit, le procédé est interrompu pour quelques instants, le temps de faire le raccordement des fibres.

Un treillis Nefmac C19 nécessite onze passes longitudinales et onze passes transversales pour déposer le nombre adéquat de fibres et ainsi obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques désirées. Par la suite, le treillis est recouvert d'une feuille de contreplaqué sur laquelle une charge morte est déposée. Cette charge agit par gravité pour presser le composite. Après une période variant environ de 10 à 20 heures, les charges mortes sont retirées et le treillis poursuit son mûrissement à l'air pendant quelques jours supplémentaires. Après cette étape de mûrissement, le treillis est prêt à être utilisé comme armature dans une structure.

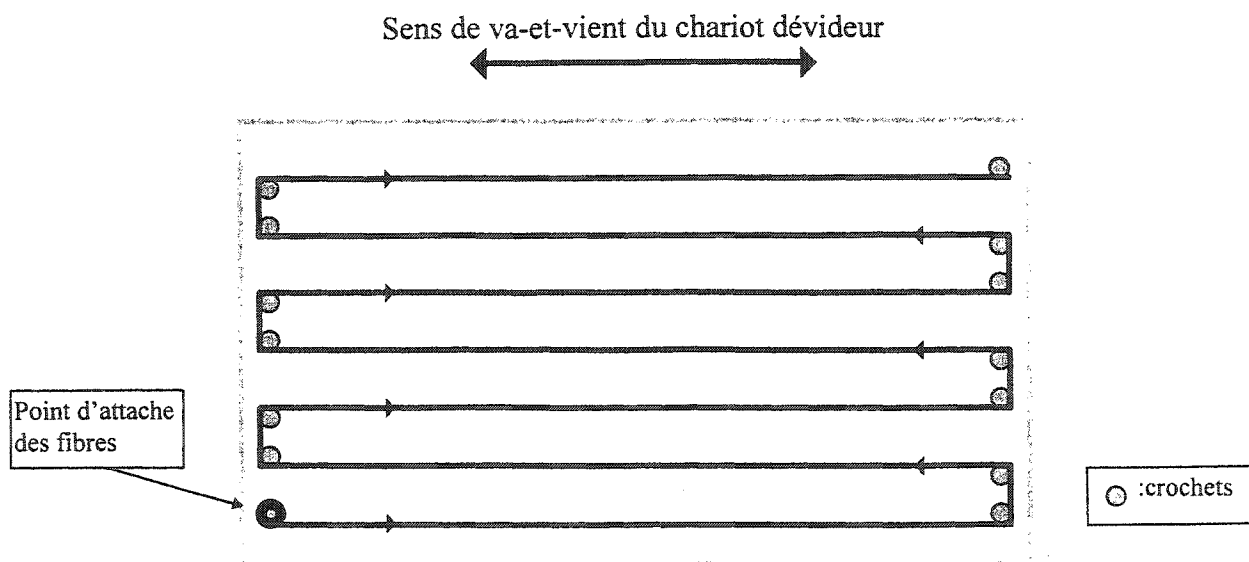


Figure 4.9: Première passe longitudinale

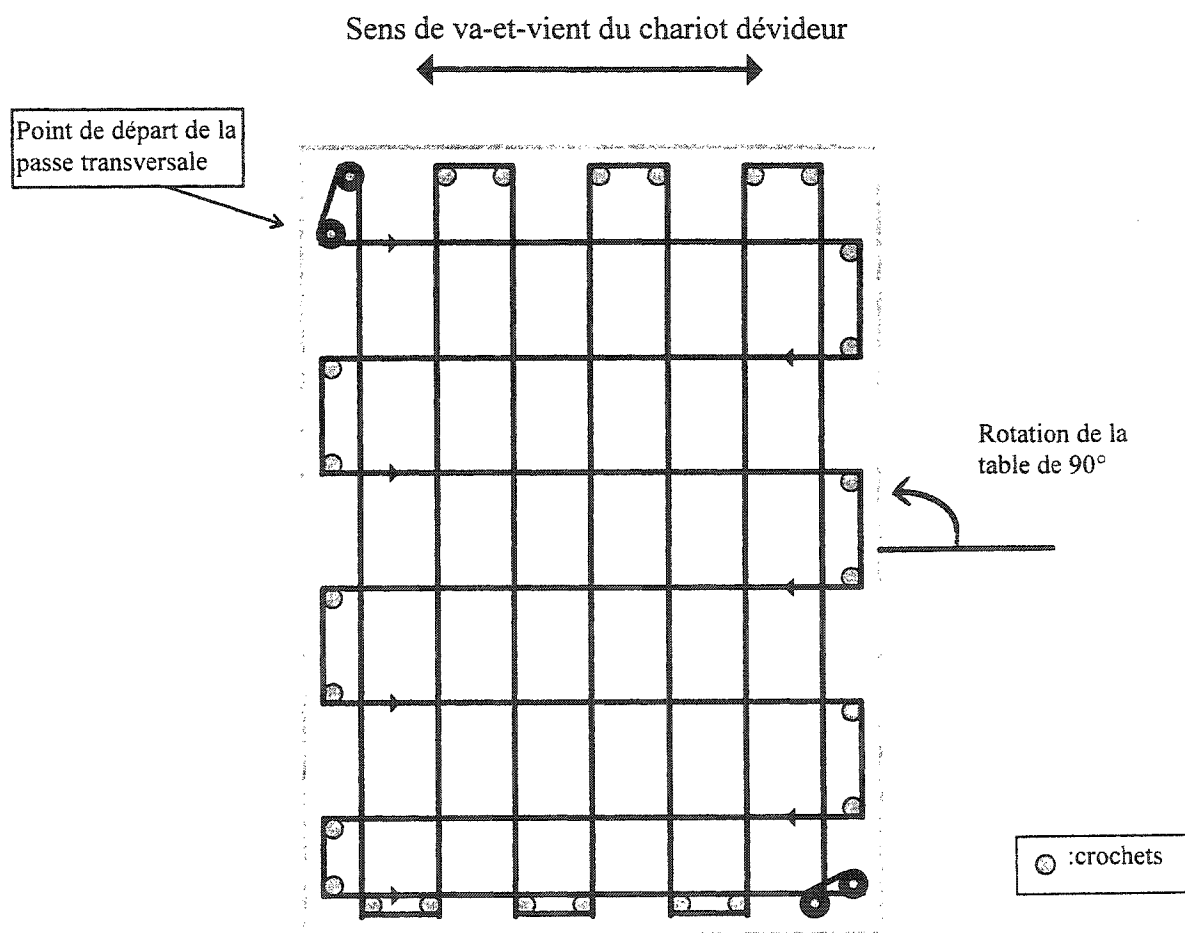


Figure 4.10: Première passe transversale

4.4 Instrumentation du pont Joffre à Sherbrooke

La reconstruction du pont Joffre (figure 4.11), qui enjambe la rivière St-François à Sherbrooke, est un projet qui fournit un excellent banc d'essai pour observer la performance des capteurs à fibre optique ainsi que le comportement des matériaux composites d'avant-garde. En effet, une section du pont Joffre a été renforcée à l'aide d'un treillis en PRFC Nefmac C19. De manière à étudier le comportement de ce type d'armature, une multitude d'instruments de mesure ont été positionnés en maints endroits dans la section du pont concernée. Les instruments de mesure employés sont des jauges de déformation et des jauges de température à fibre optique, des jauges de déformation et de température à corde vibrante et des jauges électriques. En plus de suivre les comportements de l'armature de PRFC et de la section du pont instrumentée, le projet du pont Joffre offre une excellente occasion d'observer et de comparer entre eux différents instruments de mesure dans une construction réelle.



Figure 4.11 Vue aérienne de la reconstruction du pont Joffre

4.4.1 Description du projet

La section du pont Joffre faisant l'objet de l'expérimentation est située dans la première des cinq portées en partant de l'extrémité ouest du pont. Différents types de matériaux composites ont été utilisés pendant la reconstruction du pont Joffre. L'armature conventionnelle d'une portion du chasse-roues a été remplacée, sur quelques mètres, par des barres et des étriers en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV). À la même distance sur le pont, mais de l'autre côté de la chaussée, le même type d'armature (PRFV) a été employé pour renforcer le trottoir (figure 4.12).

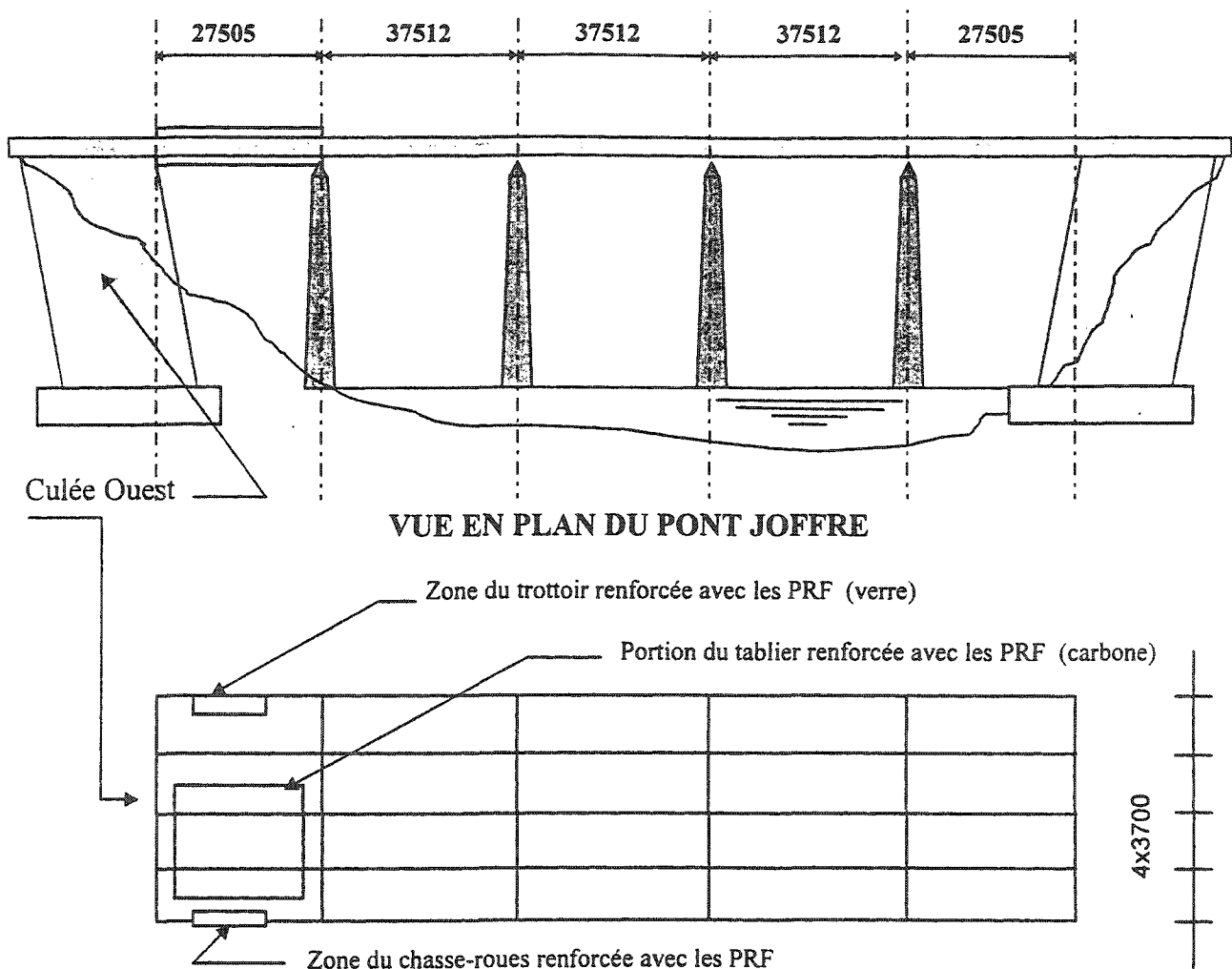


Figure 4.12 Schéma montrant l'emplacement des renforcements en PRF

En ce qui a trait aux voies de circulation, une portion de 11,50 m de longueur par 7,30 m de largeur d'armature conventionnelle a été remplacée, en sa couche supérieure, par un treillis en PRFC, le Nefmac C19 (2,3 m * 3,6 m). Ces détails sont présentés sur la figure 4.13.

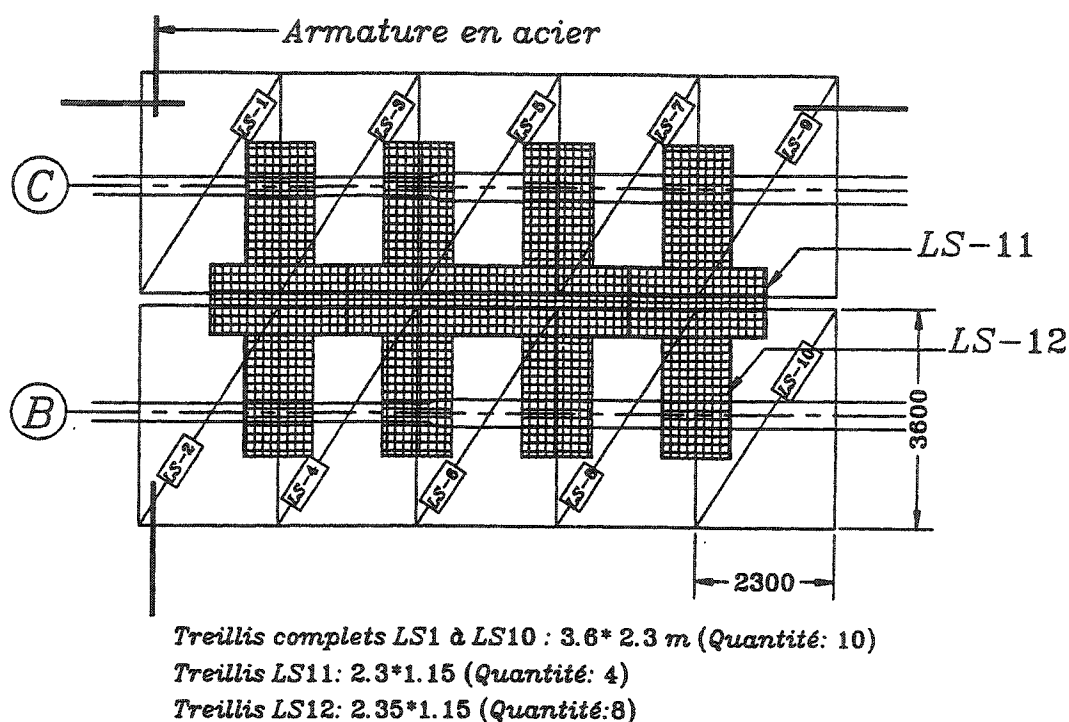


Figure 4.13 Portée du pont Joffre dont une section de l'armature est du PRFC

Quelques instruments de mesure (jauges électriques) ont été placés dans le trottoir et dans le chasse-roues mais la majorité des instruments sont positionnés dans le béton du tablier, sur les poutres d'acier et au niveau de l'armature en PRFC étant donné les charges et les efforts supérieurs qui y sont appliqués. Les tableaux B.1 à B.9 retrouvés à l'annexe B présentent la liste des capteurs à fibre optique, des jauges à corde vibrante et des jauges électriques ainsi que certaines de leurs caractéristiques. Les figures B.1 à B.6 placées dans cette même annexe

montrent les schémas indiquant la position des capteurs utilisés dans le projet. Les figures B.7 à B.13 montrent la plupart des instruments de mesure utilisés.

4.4.2 Installation des jauges électriques et à fibre optique sur le treillis en PRFC en laboratoire

Comme il a pu être visualisé sur la figure 4.13, un total de dix treillis Nefmac C19 ont été utilisés comme armature au niveau du tablier du pont Joffre. Douze autres treillis ont été nécessaires pour réaliser les recouvrements de manière à assurer une continuité entre les dix treillis principaux. Aucune instrumentation n'a été réalisée sur les treillis LS1 à LS4. Les treillis LS5 et LS6 ont été instrumentés avec des jauges électriques et des capteurs à fibre optique collés directement en surface du composite. Les treillis LS7 et LS8 ont été instrumentés au moyen de capteurs à fibre optique intégrés à l'intérieur de la section de PRFC composant le treillis tel que présenté à la section précédente. Finalement, les treillis LS9 et LS10 n'ont seulement été instrumentés qu'avec des capteurs à fibre optique. Toutes ces jauges serviront à établir les déformations du composite et les efforts étant appliqués sur chaque treillis et permettront une comparaison entre les divers instruments. La position des jauges et capteurs peut être observée à l'annexe B.

Le collage des jauges sur le treillis Nefmac s'est effectué dans le laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Les étapes suivies pour coller et protéger les jauges électriques et les capteurs à fibre optique sont les suivantes :

1) Préparation de la surface du treillis

- sablage de la surface pour éliminer les déformations
- nettoyage de la surface au jet d'air sous pression et à l'acétone

2a) Collage d'une jauge à fibre optique

- positionnement de la jauge à fibre optique sur la surface du treillis
- application d'une fine lanière de ruban adhésif sur la fibre optique entre la jauge et la gaine protectrice, pour assurer un bon contact entre la jauge et le treillis
- application d'une goutte de résine époxyde 5 minutes sur la fibre optique et sur la gaine mécanique pour empêcher tout mouvement de la fibre
- décollage de la fine lanière de ruban adhésif retenant la fibre optique
- collage de la jauge avec de la résine époxyde

2b) Collage d'une jauge électrique

- application d'une mince couche de résine époxyde sur la surface du matériau composite ainsi que sur la surface de la jauge électrique qui sera en contact avec le composite
- positionnement de la jauge électrique sur le matériau composite
- application d'une charge morte répartie sur la surface de la jauge électrique de manière à assurer un meilleur contact entre la jauge et le matériau hôte et à minimiser et uniformiser le film de résine époxyde entre les deux éléments

3) Mûrissement de la résine époxy pendant quelques heures

4) Protection des jauges

- application d'une couche de protection caoutchouteuse imperméable (M-Coat D)
- application de résine époxyde 5 minutes sur toute la longueur de la fibre optique nue ou sur toute la surface de la jauge électrique incluant les points de contact
- application d'une épaisse couche protectrice de caoutchouc autocollant par-dessus la couche de résine époxyde 5 minutes
- application de ruban adhésif électrique

4.4.3 Installation des différents capteurs sur les poutres maîtresses en acier

Plusieurs types de jauges de déformation ont été placés sur les poutres maîtresses du pont Joffre. Il y a notamment des cordes vibrantes, des jauges électriques et des capteurs à fibre optique. Le schéma de la figure 4.14 présente la position de chacune de ces jauges.

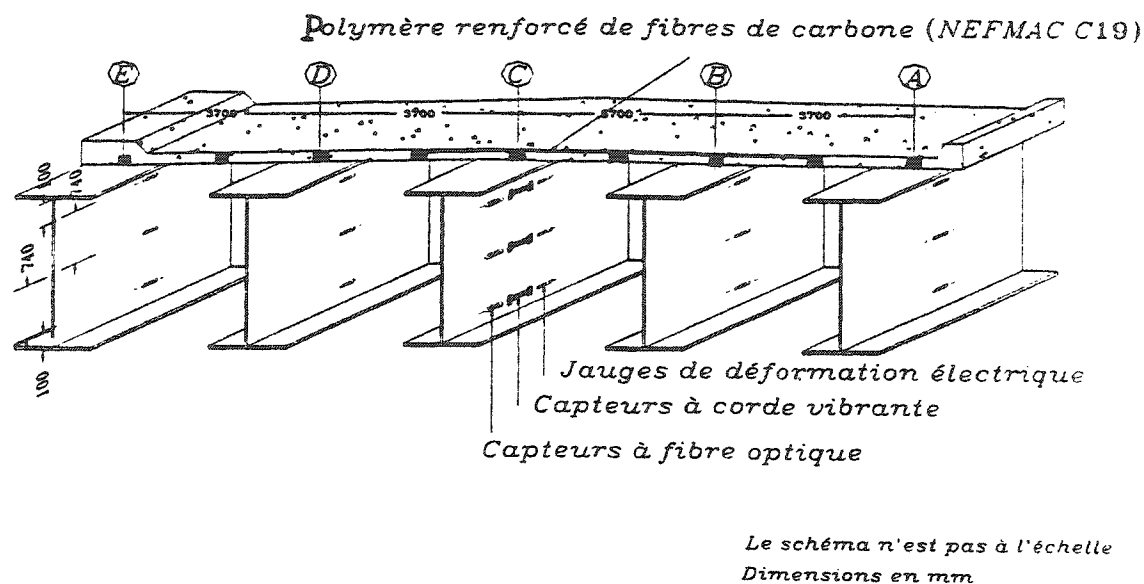


Figure 4.14 Localisation des différents capteurs sur les poutres d'acier

Les jauges à fibre optique de type SFO-W, les jauges à corde vibrante de type SM-2W et les jauges électriques de type CEA-06-W250A-350 ont été fixées sur la poutre maîtresse centrale du pont Joffre à l'aide d'une soudure par points. La figure 4.15 montre les trois types de jauges au moment de leur installation. La préparation de la surface en acier s'est fait comme suit : sablage de la surface d'acier avec un outil mécanique (meule) au départ et finition avec du papier sablé de différents grades, traitement de la surface avec de l'acétone et application de nettoyants pour les acides et pour les alcalins.

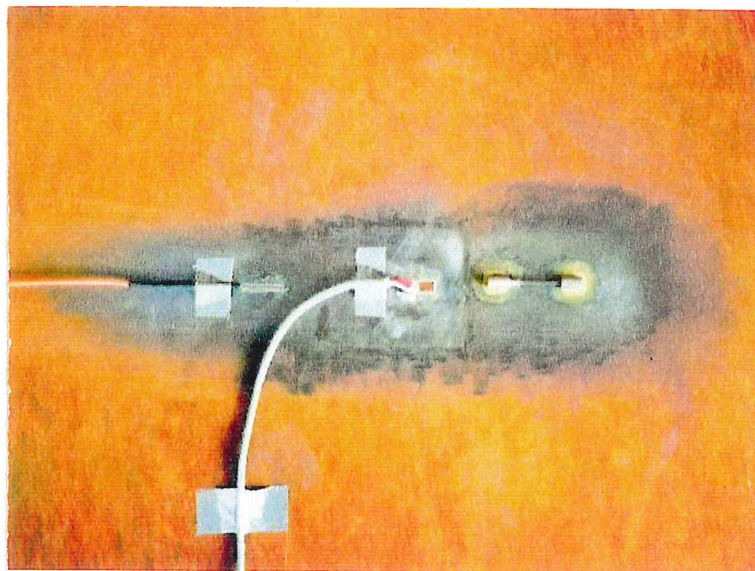


Figure 4.15 De gauche à droite: capteur SFO-W, J.E. et capteur SM-2W

Une fois les jauges installées, elles ont été protégées. Les jauges à fibre optique l'ont été par l'application d'un épais caoutchouc autocollant suivi d'un papier adhésif métallisé. Les jauges électriques ont été protégées de la même façon que celles collées sur le matériau composite à l'exception du ruban adhésif qui était, dans ce cas-ci, un ruban adhésif métallisé. Les jauges à corde vibrante n'ont pas été protégées de façon particulière étant donné que la jauge, une fois installée, se trouve déjà protégée.

4.4.4 Autres capteurs installés directement en chantier

D'autres types de jauges que ceux évoqués précédemment dans cette section ont été employés dans le projet du pont Joffre. Deux jauges de température à fibre optique (figure B.9) ont été fixées à l'armature composite, au moyen de ruban isolant électrique pour être noyées dans le béton. De plus, deux jauges à fibre optique Fabry-Pérot de type EFO (figure B.11), six jauges à corde vibrante de type EM-5 (figure B.12) et trente-six jauges électriques de type EGP-5-120 (figure B.5) ont été enfouies directement dans le béton du tablier du pont. Les jauges électriques ont été montées sur des supports métalliques de manière à faciliter leur installation en chantier et à assurer le meilleur alignement possible. Les jauges à corde vibrante ont été positionnées et maintenues en place à l'aide de broches. Les deux jauges à fibre optique EFO ont, quant à elles, été fixées sur une jauge électrique et sur une jauge à corde vibrante. La figure 4.16 présente ces différents types de jauges après leur installation en chantier.



Figure 4.16 Capteurs enfouis dans le béton du tablier

5. PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Essais de laboratoire

5.1.1 Essais thermiques

Trois capteurs à fibre optique dont deux de type SFO et un de type EFO ont été placés dans des enceintes permettant de faire varier la température entre -20 et + 70 °C lors de la première étape des essais thermiques. Les figures 5.1 à 5.3 présentent, sous forme de graphiques, les résultats obtenus lors des variations de température imposées à ces capteurs.

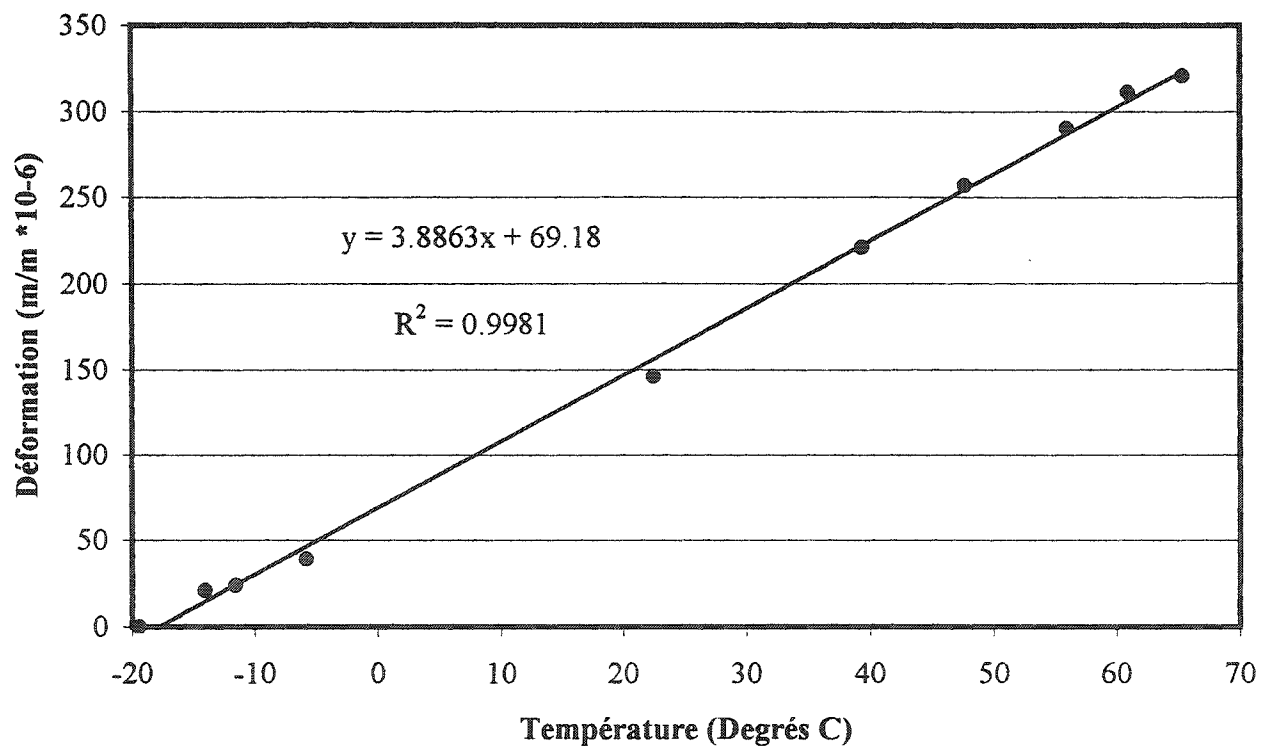


Figure 5.1 Réponse du capteur SFO 100 0720 selon la variation de la température

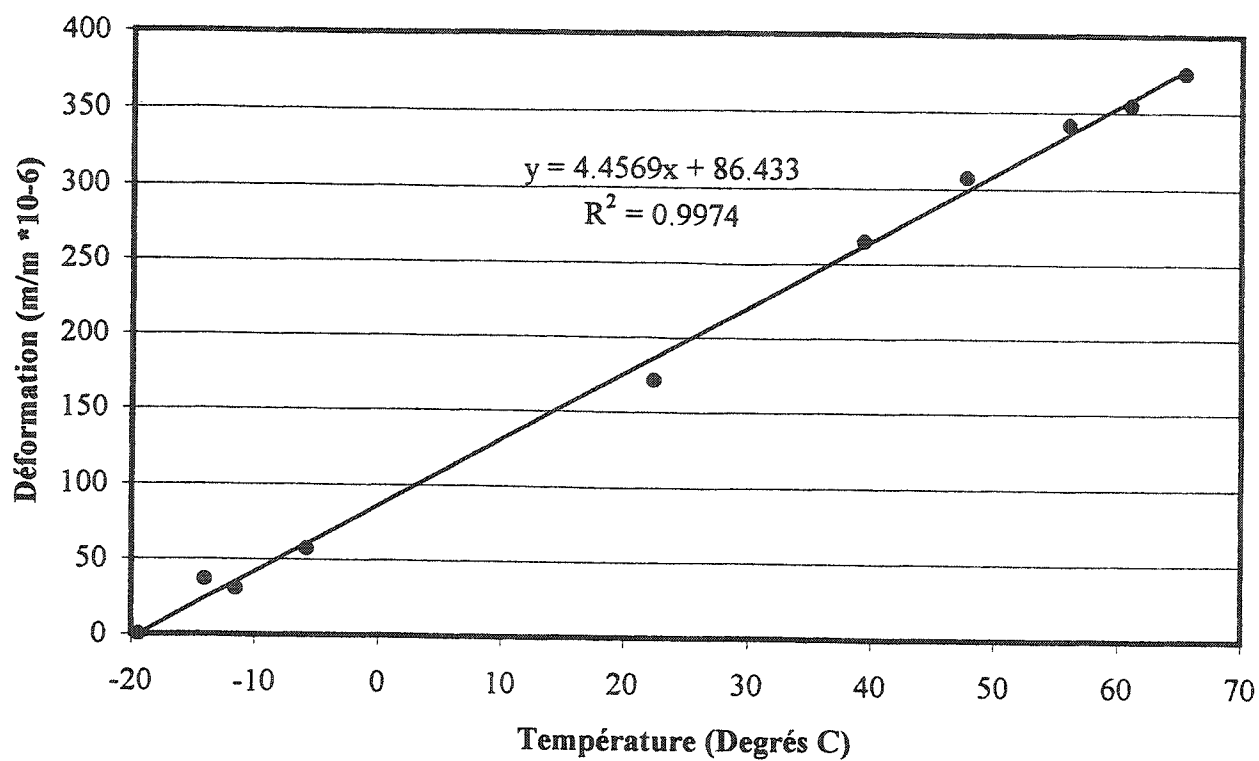


Figure 5.2 Réponse du capteur SFO 100 1401 selon la variation de la température

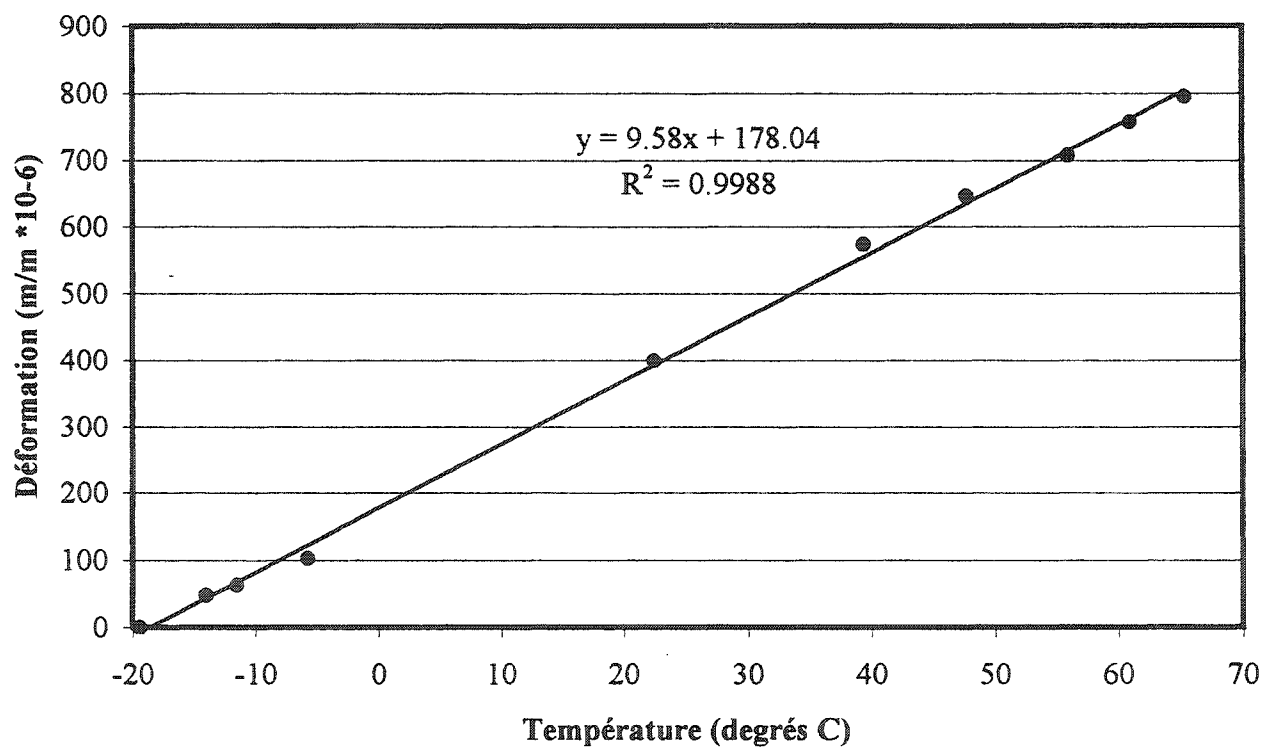


Figure 5.3 Réponse du capteur EFO 100 3020 selon la variation de la température

Ces trois graphiques démontrent que les variations de température influencent les lectures des capteurs à fibre optique. La relation entre la température et les déformations enregistrées est linéaire et les coefficients d'expansion thermiques expérimentaux obtenus sont présentés au tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 COEFFICIENTS D'EXPANSION THERMIQUES EXPERIMENTAUX

Numéro du capteur	Coefficients d'expansion thermique expérimentaux ($\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)
100 0720	3,9
100 1401	4,5
100 3020	9,6

Une différence entre les coefficients d'expansion thermique obtenus expérimentalement est remarquée entre les deux capteurs SFO 100 0720 et 100 1401. Ces deux capteurs étant du même type, leur coefficient devrait être semblable. Le fabricant des capteurs donne comme valeur du coefficient d'expansion thermique: $4,5 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ pour ce type de capteur. Cette valeur est semblable à celle trouvée avec le capteur No 100 1401. Par contre une différence de l'ordre de 13% par rapport à la valeur du fournisseur a été trouvée avec le capteur No 100 0720.

Le capteur EFO qui est composé d'un capteur à fibre optique inséré dans un tube rigide d'acier trempé présente, quant à lui, un coefficient d'expansion thermique de $9,6 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$. Étant donné l'arrangement du capteur dans le tube d'acier, les déformations lors d'une variation de température sont gouvernées par la réaction de l'acier et donc par le coefficient d'expansion thermique de l'acier utilisé. Le fabricant donne comme valeur pour ce coefficient: $9,9 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$, ce qui résulte en une différence de l'ordre de 3 % lorsque le résultat expérimental obtenu avec le capteur No 100 3020 est comparé à cette valeur du fabricant.

Suite à ces essais, cinq capteurs à fibre optique SFO ont été fixés au moyen de résine époxy à plusieurs types de matériaux tel que décrit au tableau 4.1 du chapitre précédent. La deuxième étape a été de soumettre ces échantillons à une température inférieure à 0°C. Cette opération a occasionné la mise hors d'usage de trois de ces cinq capteurs. Ces trois capteurs avaient été collés sur un tendon d'aramide, une barre d'armature en acier et une barre d'armature lisse en PRFV. Les causes de la mise hors d'usage des capteurs à fibre optique sont demeurées inconnues. Cependant, suite à la découverte de fissures dans la résine époxy servant à fixer la jauge sur le tendon en PRFA, une hypothèse a été formulée. La mise hors d'usage du capteur aurait été causé par la résine époxy lorsque celle-ci s'est fissurée. Cette hypothèse ne peut toutefois pas être confirmée par les deux autres échantillons car aucune fissure visible n'a été observée. Les deux autres échantillons soient les capteurs No 100 0730 (béton) et 100 1473 (PRFV) ont résisté à cette étape.

Au cours de la troisième étape, qui consistait à exposer les capteurs sélectionnés à une augmentation de température, deux capteurs sur les quatre testés ont été mis hors d'usage. Ces capteurs sont celui qui a été collé sur la barre d'armature d'acier (No 100 1525) et celui qui a été collé sur la barre d'armature de PRFV (No 100 1287). Aucune observation n'a permis de déterminer la cause de la perte de ces capteurs. Le capteur No 100 1473, qui a subi les essais à basses températures avec succès, a donc été réutilisé lors de la troisième étape étant donné la mise hors d'usage du capteur No 100 1287. Les résultats obtenus avec le capteur No 100 0670 collé sur l'éprouvette de béton sont présentés sur la figure 5.4 et ceux obtenus avec le capteur No 100 1473 fixé sur la barre d'armature lisse de PRFV sont présentés à la figure 5.5.

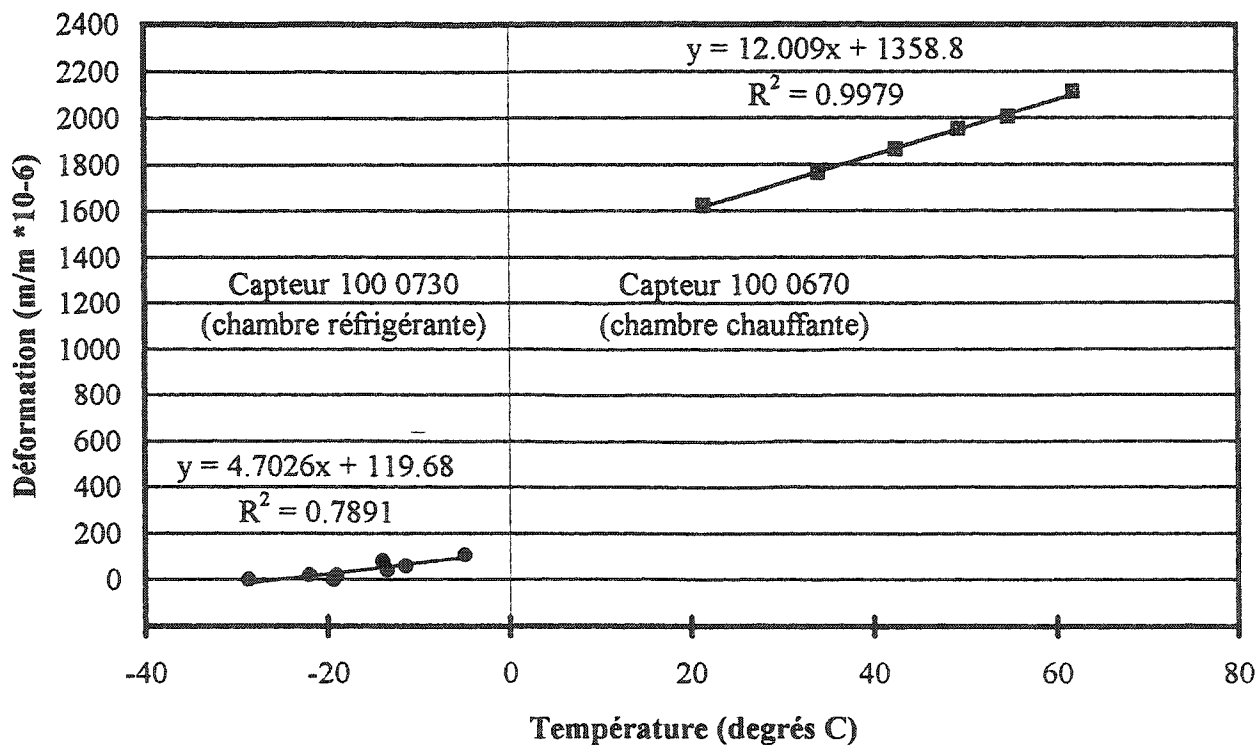


Figure 5.4 Essais thermiques avec capteurs SFO collés sur éprouvettes de béton cylindriques

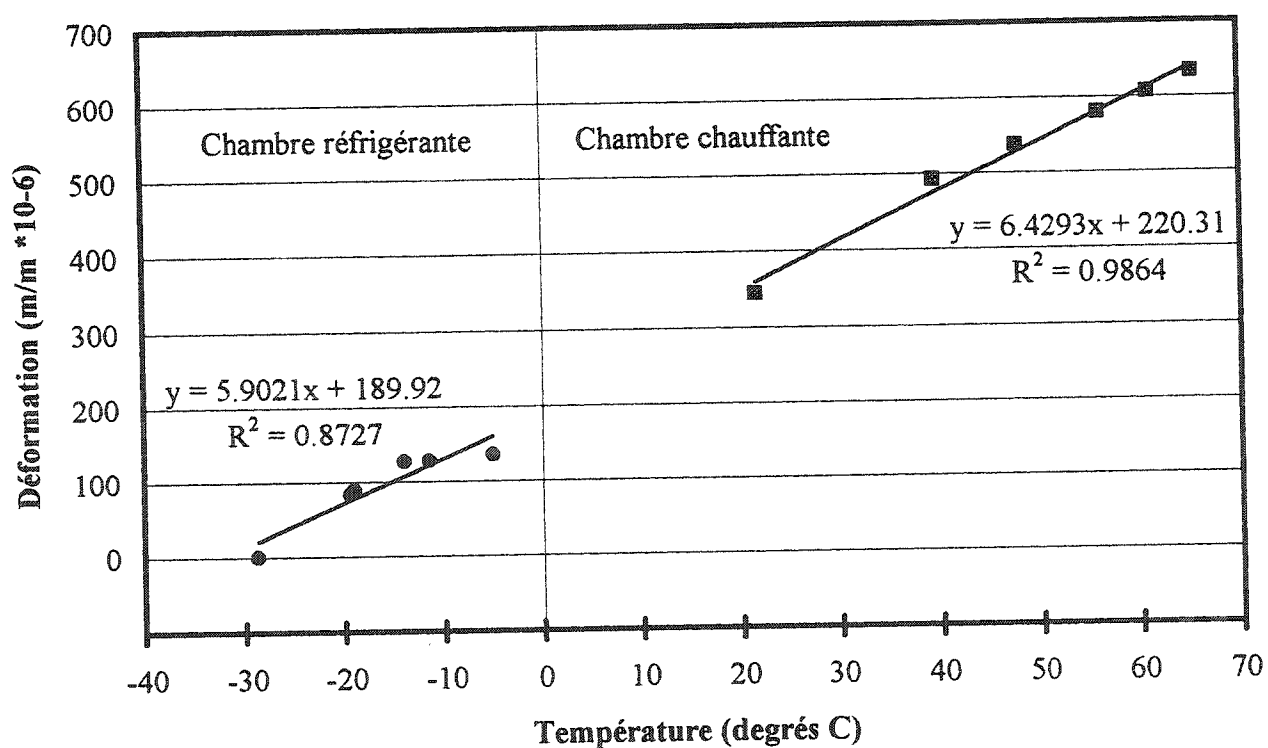


Figure 5.5 Essais thermiques avec un capteur SFO collé sur une barre d'armature de PRFV

Sur la figure 5.4, les deux séries de points n'ayant pas été obtenues avec le même capteur, les résultats ont été positionnés sur le graphique afin que la déformation "0" corresponde à la plus basse température respective de chacun des essais. L'observation des résultats portés en graphique démontre que le comportement des deux capteurs n'est pas le même. La pente de chacune des deux courbes du graphique donne les coefficients d'expansion thermique des deux échantillons. Le calcul de ces coefficients donne des valeurs respectives de 6,0 et 12,0 $\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ pour les capteurs No 100 0730 et 100 0670. Les résultats suggèrent donc un coefficient d'expansion thermique qui serait le double (ou la moitié) lorsque les deux courbes sont comparées ensembles. Il est à noter que ces essais ont été réalisés sur deux éprouvettes cylindriques différentes, avec deux capteurs différents et sur deux intervalles de températures différentes. Les facteurs pouvant expliquer ces différences sont: un mauvais fonctionnement des équipements chauffant et/ou réfrigérant, une différence possible de comportement des capteurs à basses et à hautes températures, un mauvais positionnement (linéarité) des capteurs sur les échantillons et la mauvaise homogénéité du matériau hôte.

La figure 5.5 montre, elle aussi, des différences entre les comportements à basse et haute température. Les coefficients de dilatation thermique expérimentaux sont de 5,9 et 6,4 $\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ respectivement pour les essais menés dans la chambre réfrigérante et dans la chambre chauffante. Un écart de 8,5% existe donc entre ces deux valeurs. Il est aussi remarqué sur cette figure que les points obtenus de la chambre réfrigérante sont plus dispersés autour de la droite de régression que ceux obtenus de la chambre chauffante. Cette observation s'accorde aussi avec les résultats obtenus avec les éprouvettes de béton cylindriques.

5.1.2 Essais mécaniques

La présente sous-section traite des essais mécaniques réalisés dans le cadre de ce projet. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques de la contrainte (MPa) en fonction de la déformation ($\mu\epsilon$). Certains résultats ont été regroupés et d'autres jugés répétitifs ne sont pas présentés dans cet ouvrage de manière à demeurer à l'intérieur d'une certaine concision.

5.1.2.1 *Barres d'armature lisses en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV)*

Plusieurs essais ont été réalisés sur quatre barres d'armature lisses en PRFV et les résultats obtenus sont présentés aux figures 5.6 à 5.9 ainsi qu'aux tableaux 5.2 et 5.3. Comme il a été présenté au tableau 4.2 du chapitre précédent, trois de ces quatre barres ne comportaient pour instrumentation qu'un seul capteur SFO. La quatrième barre testée, quant à elle, était instrumentée d'un capteur à fibre optique et d'une jauge électrique.

TABLEAU 5.2 RESULTATS OBTENUS AVEC LES TROIS BARRES D'ARMATURE LISSES EN PRFV INSTRUMENTÉES AVEC SEULEMENT UN CAPTEUR À FIBRE OPTIQUE SFO

No capteur	Étape lors de l'essai	Module d'élasticité expérimental (MPa)	Coefficient de régression linéaire (R ²)
100 1473	1 ^{er} chargement	47 400	0,9997
	2 ^e chargement	69 300	0,9882
100 1218	1 ^{er} chargement	45 700	0,9999
	1 ^{er} déchargement	84 000	0,9991
	2 ^e chargement	88 100	0,9932
	2 ^e déchargement	87 000	0,9923
100 1272	1 ^{er} chargement	47 900	0,9999
	1 ^{er} déchargement	48 300	0,9998
	2 ^e chargement	48 300	1,0000
	2 ^e déchargement	69 500	0,9994

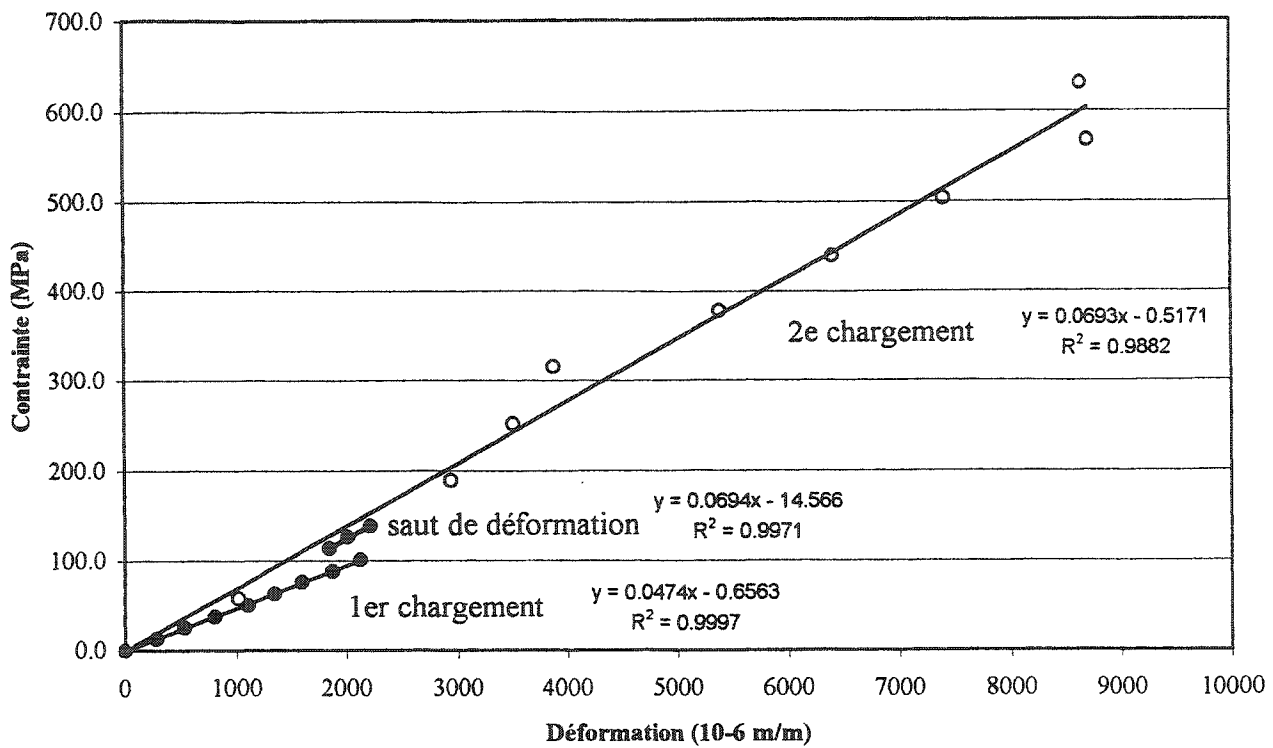


Figure 5.6 Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1473

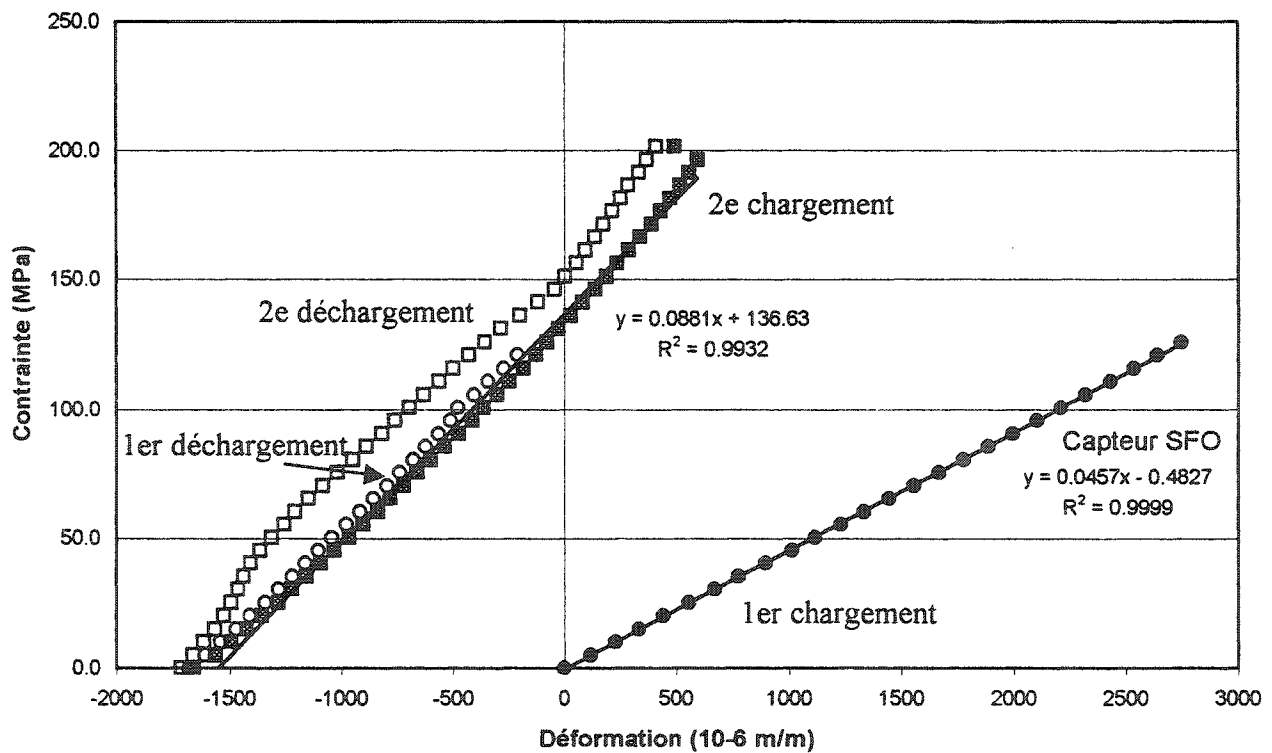


Figure 5.7 Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1218

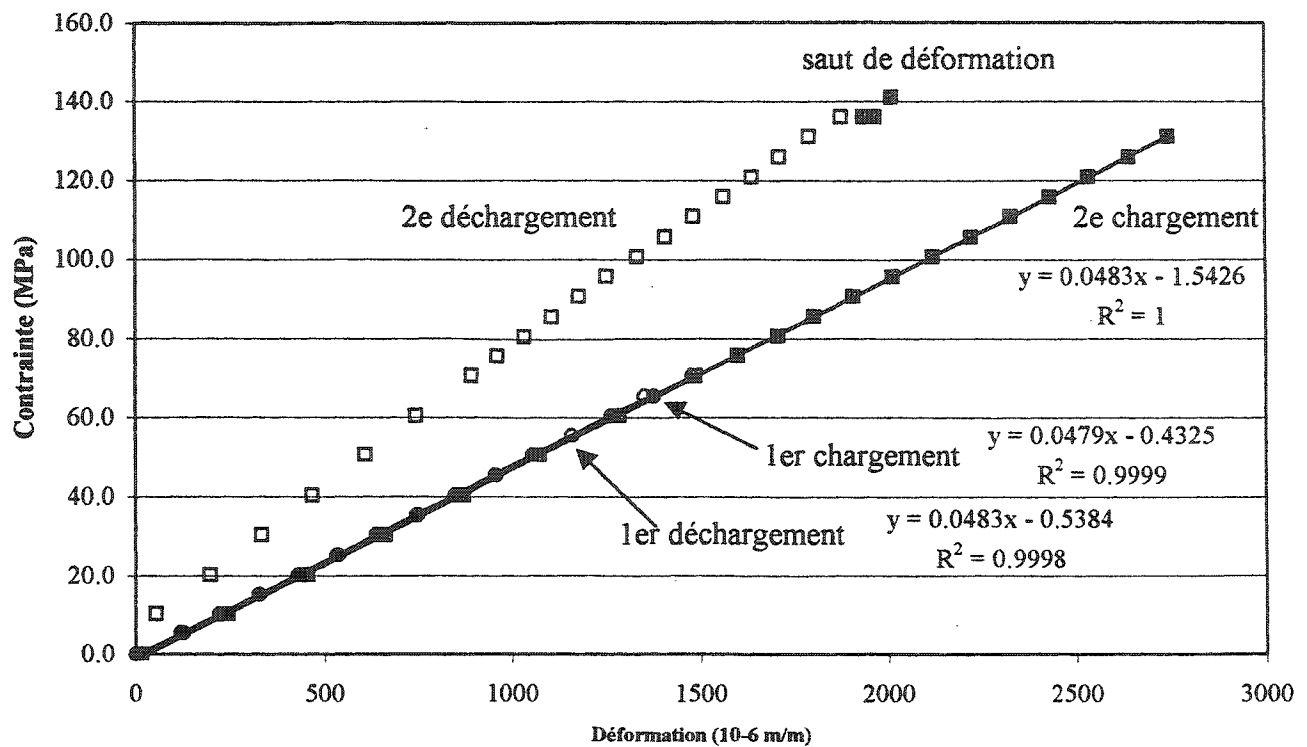


Figure 5.8 Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1272

L'observation des figures 5.6 à 5.8 et du tableau 5.2 permet de voir qu'il n'y a eu que deux mises en charge réalisées sur chacun de ces échantillons. Les essais ont été arrêtés sur ces capteurs en raison de l'apparition d'une irrégularité dans les lectures de déformations fournies par le poste de lecture des capteurs SFO. En effet, un comportement, qui sera qualifié de saut des déformations dans la suite du texte, est survenu respectivement à 2 130, 2 747 et 2 744 $\mu\epsilon$ pour les capteurs SFO Nos 100 1473, 100 1218 et 100 1272. Avant que ces sauts de déformations ne surviennent, les capteurs renvoyaient des lectures démontrant un comportement à peu près équivalent. Les modules d'élasticité de ces trois échantillons calculés à partir d'une régression linéaire (voir tableau 5.2), variaient entre 45 700 et 48 300 MPa. Après les sauts de déformations, les capteurs

ont continué de fonctionner mais les lectures sont devenues irrégulières. Les points montraient une plus grande dispersion autour de la droite de régression linéaire et les pentes des graphiques ont donné des valeurs entre 69 300 et 88 100 MPa.

Le graphique de la figure 5.9 présente la mise en charge d'une barre d'armature lisse en PRFV sur laquelle un capteur SFO (100 1236) et une jauge électrique ont été fixés. Un total de neuf chargements ont été réalisés sur cette barre dont le premier et le huitième sont présentés sur cette figure. Le tableau 5.3 présente, quant à lui, le résumé des résultats obtenus avec cet échantillon.

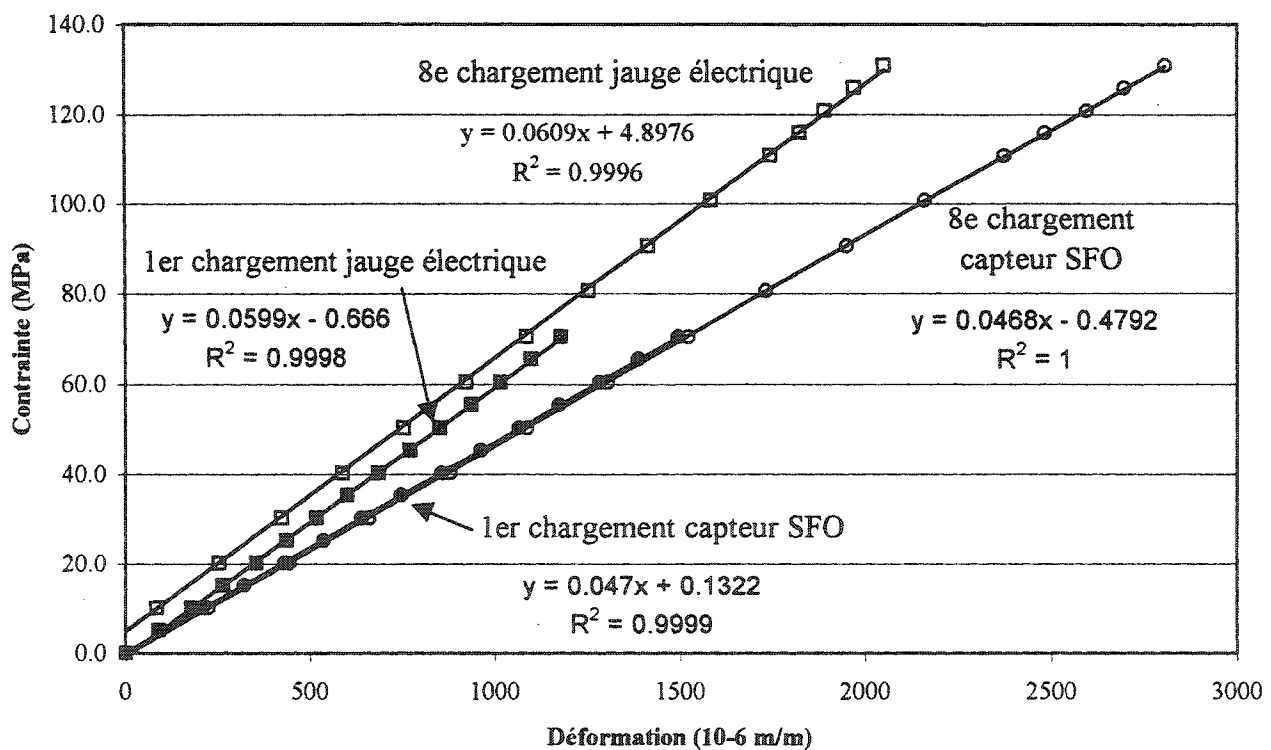


Figure 5.9 Essais de traction sur PRFV avec le capteur SFO 100 1236 et une J.E.

TABLEAU 5.3 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA BARRE D'ARMATURE LISSE EN PRIV INSTRUMENTÉE AVEC UN CAPTEUR SFO (100 1236) ET UNE J.E.

Chargement	Module d'élasticité F.O. [MPa] (coef. rég. lin.)	Module d'élasticité J.E. [MPa] (coef. rég. lin.)	Comparaison entre F.O. et J.E. (%)
1 ^{er} chargement	47 000 (0,9999)	59 900 (0,9998)	-21,5
2 ^e chargement	46 900 (0,9999)	59 400 (0,9997)	-21,0
3 ^e chargement	47 000 (0,9999)	59 400 (0,9997)	-20,9
4 ^e chargement	46 700 (0,9999)	59 700 (0,9997)	-21,8
5 ^e chargement	46 900 (1,0000)	60 300 (0,9998)	-22,2
6 ^e chargement	46 800 (0,9999)	61 000 (0,9995)	-23,3
7 ^e chargement	46 700 (0,9999)	60 400 (0,9998)	-22,7
8 ^e chargement	46 800 (1,0000)	60 900 (0,9996)	-23,2
9 ^e chargement	46 800 (1,0000)	61 300 (0,9994)	-23,7

L'observation de la figure 5.9 et du tableau 5.3 permet de voir qu'il y a eu neuf mises en charge réalisées sur cet échantillon. Lors des huit premiers chargements, le calcul des modules d'élasticité a donné des valeurs variant de 46 700 à 47 000 MPa pour le capteur SFO et de 59 400 à 61 300 MPa pour la jauge électrique. Deux particularités peuvent donc être notées suite à ces résultats. La première est que les résultats obtenus avec la jauge électrique sont plus variables que ceux obtenus avec le capteur SFO. La deuxième particularité est qu'il existe un écart de plus de 20 % entre les deux instruments de mesure et que cet écart tend à augmenter avec l'augmentation de la charge et des déformations, passant de 21,5 à 23,7 %. L'augmentation de cet écart semble être provoquée par l'augmentation des modules d'élasticité obtenus avec la jauge électrique lors de l'augmentation de la charge et des déformations.

Les essais ont été arrêtés après le neuvième déchargement en raison de l'apparition d'un saut de déformation à $2\,954\ \mu\epsilon$ obtenu avec le capteur SFO. Lors de la neuvième mise en charge, l'échantillon a été soumis à une déformation maximale de $3\,235\ \mu\epsilon$ qui est supérieure à la déformation à laquelle le saut s'est produit. Toujours lors du neuvième déchargement, les lectures renvoyées par la jauge électrique sont demeurées constantes, même lors du saut de déformations noté par le capteur SFO 100 1236. Donc, d'après ces informations, ce serait le capteur SFO qui fournirait, à partir d'un certain point, des données erronées. Ce raisonnement s'appuie sur le fait que la jauge électrique continue de présenter un comportement constant lors du phénomène de saut de déformations. Ce ne serait donc pas l'échantillon de PRFV qui en serait la cause.

5.1.2.2 Barres d'armature crénelées en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV)

D'autres essais ont été réalisés sur des barres d'armature en PRFV provenant d'un autre fabricant. Trois barres crénelées ont été testées et les résultats obtenus sont présentés aux figures 5.10 à 5.12 ainsi qu'au tableau 5.4. Comme il a été présenté au tableau 4.2 du chapitre précédent, deux de ces trois barres ont été instrumentées avec un capteur SFO et une jauge électrique. La troisième barre testée a été instrumentée de deux capteurs à fibre optique: un capteur SFO et un réseau de Bragg.

TABLEAU 5.4 RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES TROIS BARRES D'ARMATURE CRÊNELÉES EN PRFV

No. capteur SFO	Chargement	Module d'élast. SFO [MPa] (coef. rég. lin.)	Module d'élast. J.E. (ou Bragg) [MPa] (coef. rég. lin.)	Comparaison (%)
100 1216	1 ^{er}	39 700 (0,9997)	36 500 (0,9998)	+8,8
	2 ^e	37 000 (0,9998)	34 700 (0,9998)	+6,6
	3 ^e (avant saut)	29 100 (0,9998)	35 100 (0,9999)	-17,1
	3 ^e (après saut)	38 200 (0,9994)	35 100 (0,9999)	+8,8
	4 ^e (après saut)	38 000 (1,0000)	35 100 (1,0000)	+8,3
	5 ^e (après saut)	37 800 (0,9999)	35 200 (1,0000)	+7,4
	6 ^e (après saut)	37 300 (0,9998)	35 300 (1,0000)	+5,7
	7 ^e (après saut)	36 500 (0,9996)	35 300 (1,0000)	+3,4
	8 ^e (après saut)	35 600 (0,9996)	35 300 (1,0000)	+0,8
100 1264	1 ^{er}	50 500 (0,9997)	38 400 (0,9993)	+31,5
	2 ^e	48 700 (0,9997)	37 700 (0,9998)	+29,2
	3 ^e	50 400 (0,9997)	37 500 (0,9998)	+34,4
	4 ^e	51 500 (0,9995)	37 300 (0,9999)	+38,1
	5 ^e	53 000 (0,9996)	37 100 (0,9999)	+42,9
100 0720 (SFO) 00714 (Bragg)	1 ^{er}	37 000 (0,9997)	36 400 (0,9998)	+1,6
	2 ^e	37 100 (0,9999)	35 700 (0,9999)	+3,9
	3 ^e	---	37 300 (0,9993)	---

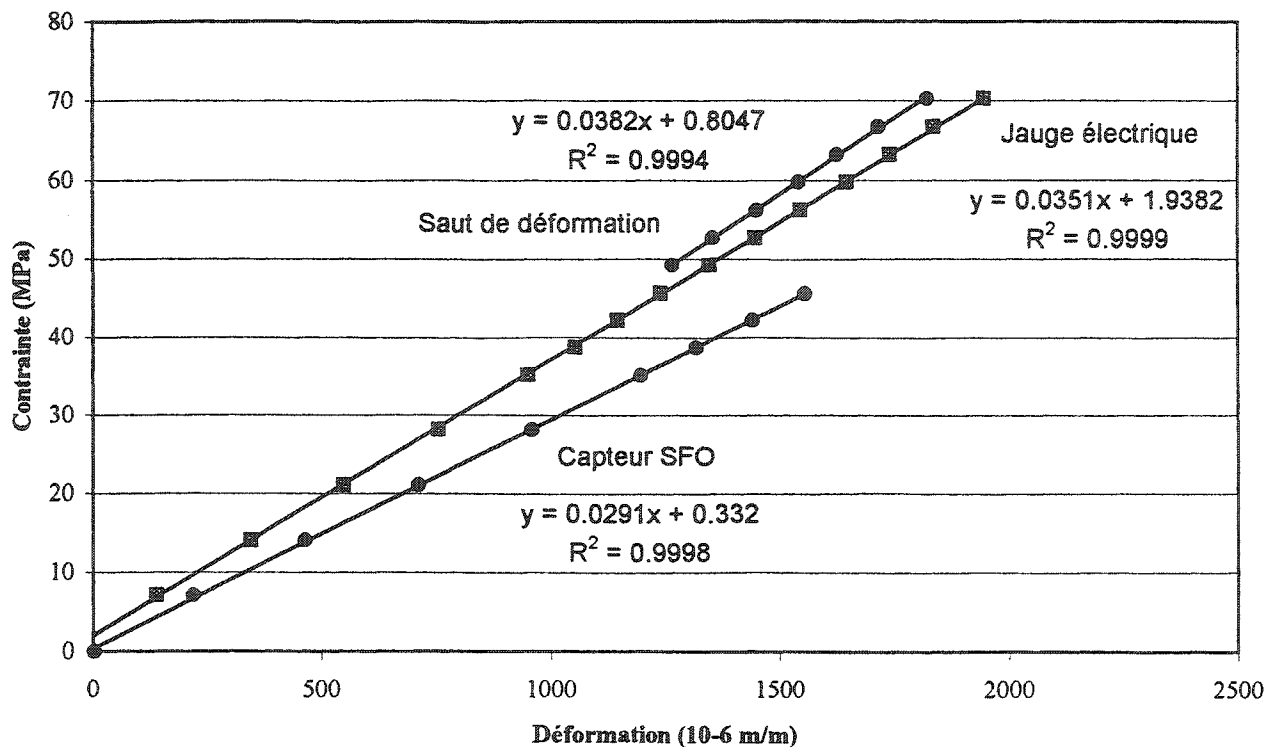


Figure 5.10 Essais de traction sur PRFV avec capteur SFO 100 1216 et J.E.

La figure 5.10 montre typiquement le phénomène de saut de déformations qui s'est produit dans ce cas à une déformation de 1 558 $\mu\epsilon$ lors du troisième chargement avec le capteur SFO 100 1216. Lors de ce chargement, le module d'élasticité a diminué de 21,4 % par rapport au module obtenu lors du 2^e chargement. Après le saut de déformations, le module d'élasticité est revenu à des valeurs semblables à celles obtenues lors des deux premiers chargements. Il est à noter que les essais se sont poursuivis pendant cinq autres chargements et jusqu'à une déformation maximale de 6 000 $\mu\epsilon$. Lors de ces chargements (4^e au 8^e chargements) réalisés après le saut de déformation, le capteur semblait fonctionner normalement. Dans ce cas-ci, les résultats obtenus avec le capteur SFO sont plus variables que ceux obtenus avec la jauge électrique. Les modules d'élasticité du capteur SFO ont varié entre 29 100 et 39 700 $\mu\epsilon$, alors que ceux de la jauge électrique sont demeurés dans l'intervalle 35 100 et 36 500 $\mu\epsilon$.

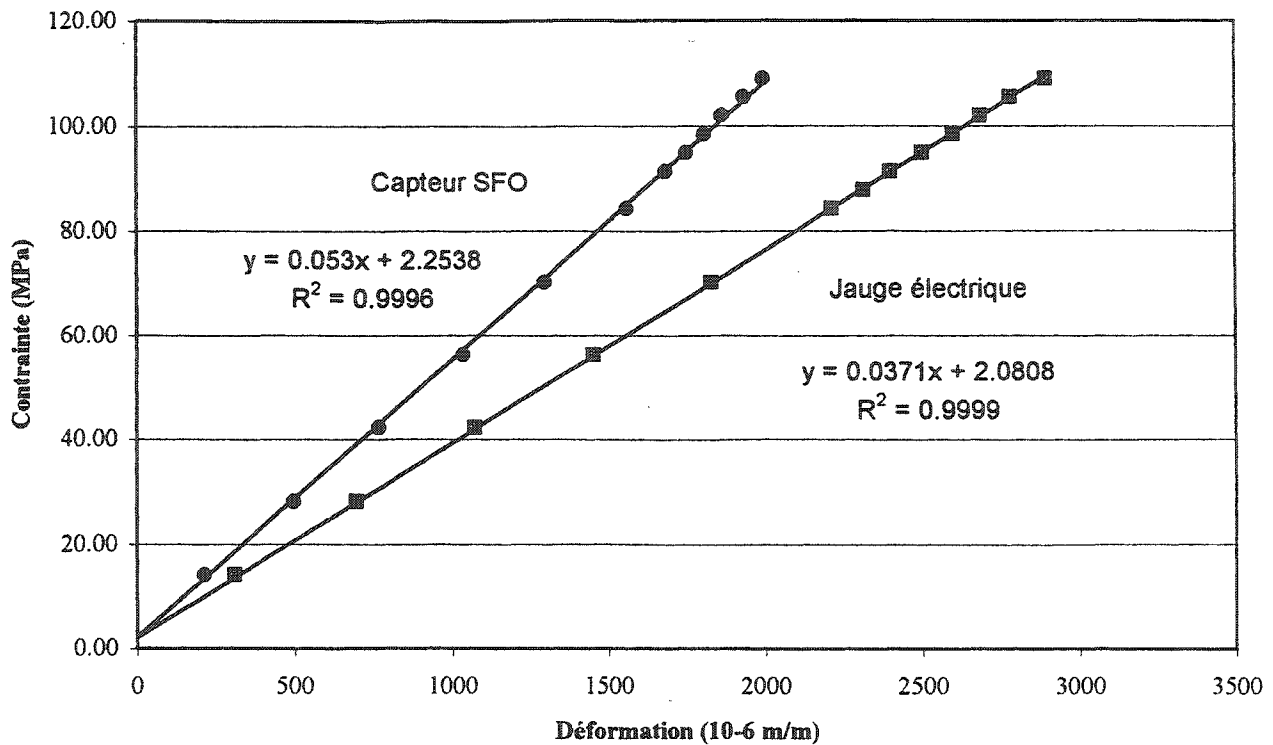


Figure 5.11 Essais de traction sur PRFV avec capteur SFO 100 1264 et J.E.

La figure 5.11 présente le 5^e chargement effectué sur la barre d'armature crénelée en PRFV instrumentée avec le capteur SFO 100 1264 et une jauge électrique. Les résultats obtenus avec cet échantillon sont présentés au tableau 5.4. Lors des cinq premiers chargements, le calcul des modules d'élasticité a donné des valeurs variant de 48 700 à 53 000 MPa pour le capteur SFO et de 38 400 à 37 100 MPa pour la jauge électrique. Deux particularités ressortent suite à ces résultats. La première est que les résultats obtenus avec le capteur SFO sont plus variables que ceux obtenus avec la jauge électrique. La deuxième particularité est qu'il existe un écart moyen de 35 % entre les deux instruments de mesure et que cet écart tend à augmenter avec l'augmentation de la charge et des déformations, passant de 31,5 à 42,9 %. L'augmentation de cet écart est provoquée par l'augmentation des modules d'élasticité obtenus avec le capteur SFO jumelée à la diminution des modules d'élasticité obtenus avec la jauge électrique. Les essais ont été arrêtés après le cinquième déchargement en raison de l'apparition d'un saut de déformations à

1 996 $\mu\epsilon$ obtenu avec le capteur SFO. Lors de ce déchargement, les lectures renvoyées par la jauge électrique sont demeurées constantes, même lors du saut de déformations noté par le capteur SFO 100 1264. Donc, le même comportement a été observé avec cet échantillon qu'avec la barre d'armature lisse en PRFV instrumentée avec le capteur SFO 100 1236.

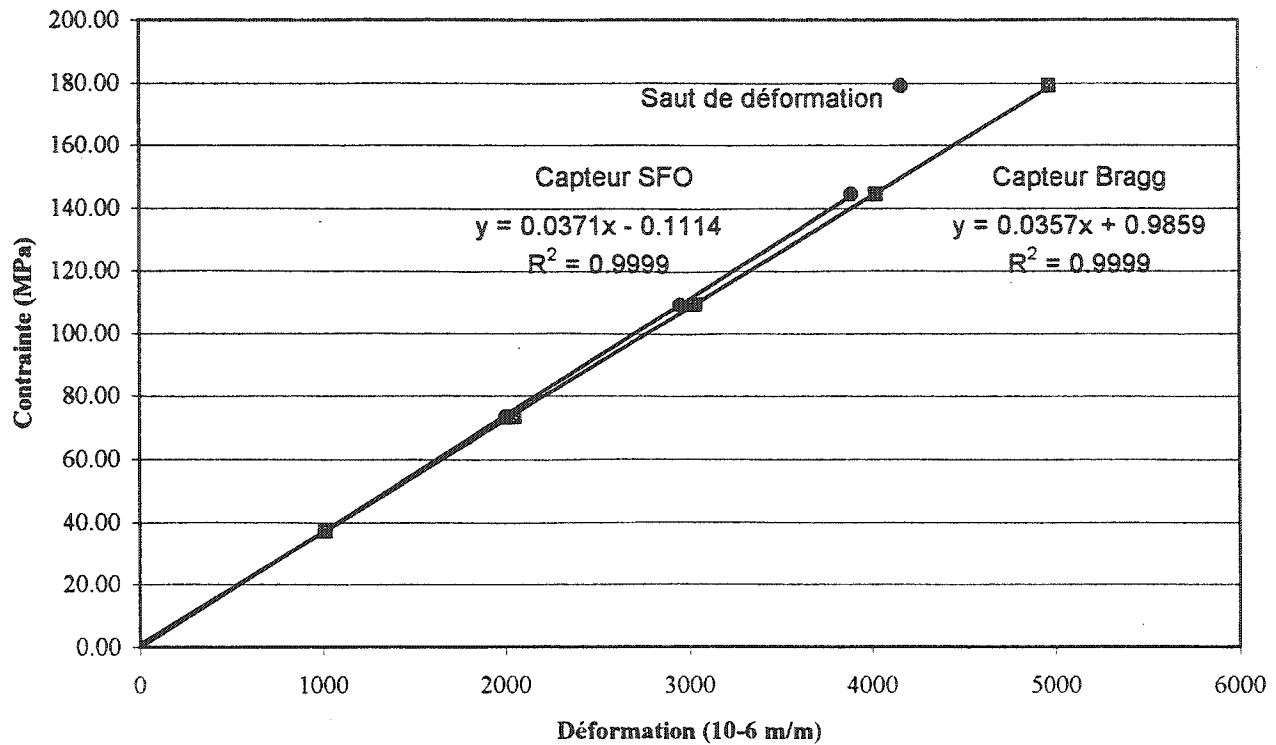


Figure 5.12 Essais de traction sur PRFV avec capteurs SFO 100 0720 et Bragg 00714

La figure 5.12 présente le 2^e chargement effectué sur la barre d'armature crénelée en PRFV instrumentée avec les deux capteurs à fibre optique: le SFO 100 0720 et le réseau de Bragg 00714. Les résultats obtenus avec cet échantillon sont présentés au tableau 5.4. Les deux modules d'élasticité calculés à partir des résultats obtenus donnent des valeurs présentant des écarts de 1,6 et 3,9 %. L'apparition d'un saut de déformations avec le capteur SFO lors du 2^e chargement à 3 889 $\mu\epsilon$ a été observé. Un troisième chargement a été réalisé en enregistrant seulement que les lectures du réseau de Bragg. Les essais ont été arrêtés après ce troisième

chargement qui s'est terminé à une déformation de 5 777 $\mu\epsilon$ avec l'apparition d'une instabilité dans les lectures fournies par le réseau de Bragg.

5.1.2.3 Barres d'armature crénelées en acier

Des essais ont aussi été réalisés sur des barres d'armature crénelées de calibre 20M en acier. Trois (3) barres crénelées ont été testées et les résultats obtenus sont présentés aux figures 5.13 à 5.15 ainsi qu'au tableau 5.5. Comme il a été présenté au tableau 4.2 du chapitre précédent, deux de ces trois barres ont été instrumentées avec un capteur SFO et une jauge électrique. La troisième barre testée a été instrumentée de deux capteurs à fibre optique: un capteur SFO et un réseau de Bragg.

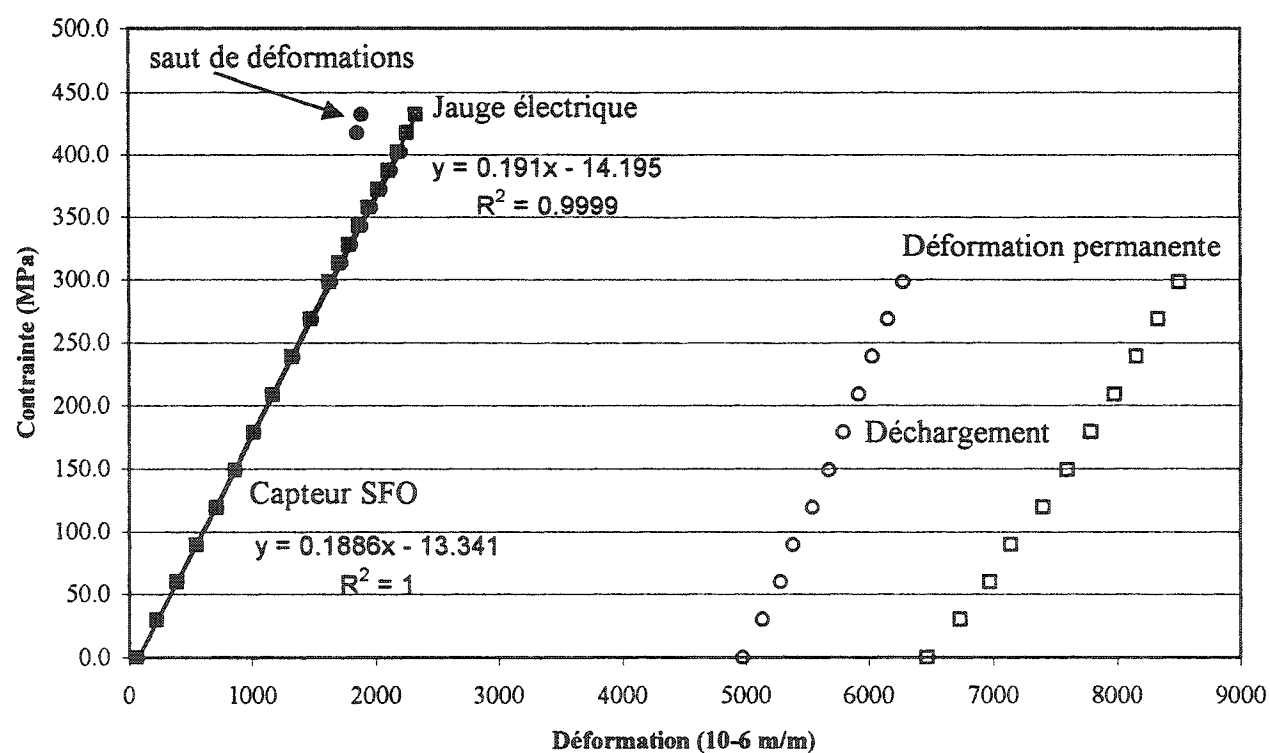


Figure 5.13 Essais de traction sur acier avec capteur SFO 100 1295 et J.E.

TABLEAU 5.5 RÉSULTATS OBTENUS AVEC TROIS BARRES D'ARMATURE CRÉNELÉES EN ACIER

No. capteur SFO	Chargement	Module d'élast. SFO [MPa] (coef. rég. lin.)	Module d'élast. J.E. (ou Bragg) [MPa] (coef. rég. lin.)	Comparaison (%)
100 1295	1 ^{er}	175 000 (0,9990)	176 000 (0,9985)	-0,6
	2 ^e	180 700 (0,9999)	180 700 (0,9997)	0,0
	3 ^e	184 400 (0,9999)	185 800 (0,9997)	-0,8
	4 ^e	186 000 (0,9999)	187 600 (0,9998)	-0,9
	5 ^e	188 600 (1,0000)	191 000 (0,9999)	-1,3
100 1287	1 ^{er}	196 900 (0,9996)	201 200 (0,9996)	-2,1
	2 ^e	191 200 (0,9968)	193 800 (0,9961)	-1,3
	3 ^e	193 000 (0,9993)	195 000 (0,9996)	-1,0
100 1401 (SFO) 00720 (Bragg)	1 ^{er}	---	196 900 (0,9990)	---
	2 ^e	---	190 200 (0,9993)	---
	3 ^e	---	187 500 (0,9985)	---
	4 ^e	---	187 800 (0,9995)	---
	5 ^e	---	187 000 (0,9994)	---

La figure 5.13 montre le cinquième chargement de la barre d'acier instrumentée du capteur 100 1295 et d'une jauge électrique. Un saut de déformation s'est produit à 2 208 $\mu\epsilon$. Par la suite à 2 269 $\mu\epsilon$, sur la jauge électrique, le comportement plastique de l'acier a débuté. La charge a alors été enlevée de la barre et une déformation plastique résiduelle de 6 471 $\mu\epsilon$ a été observée sur la jauge électrique. Lors des cinq chargements, les modules d'élasticité du capteur SFO ont varié de 175 000 à 188 600 MPa, alors que ceux de la jauge électrique sont passés de 176 000 à

191 000 MPa. Il est à noter que du premier au cinquième chargement les modules d'élasticité obtenus avec le capteur SFO ont subi une augmentation de +7,8 % tout comme ceux obtenus avec la jauge électrique (8,5 %). Les écarts entre le capteur SFO et la jauge électrique varient au cours de ces cinq chargements entre -1,3 et 0 %.

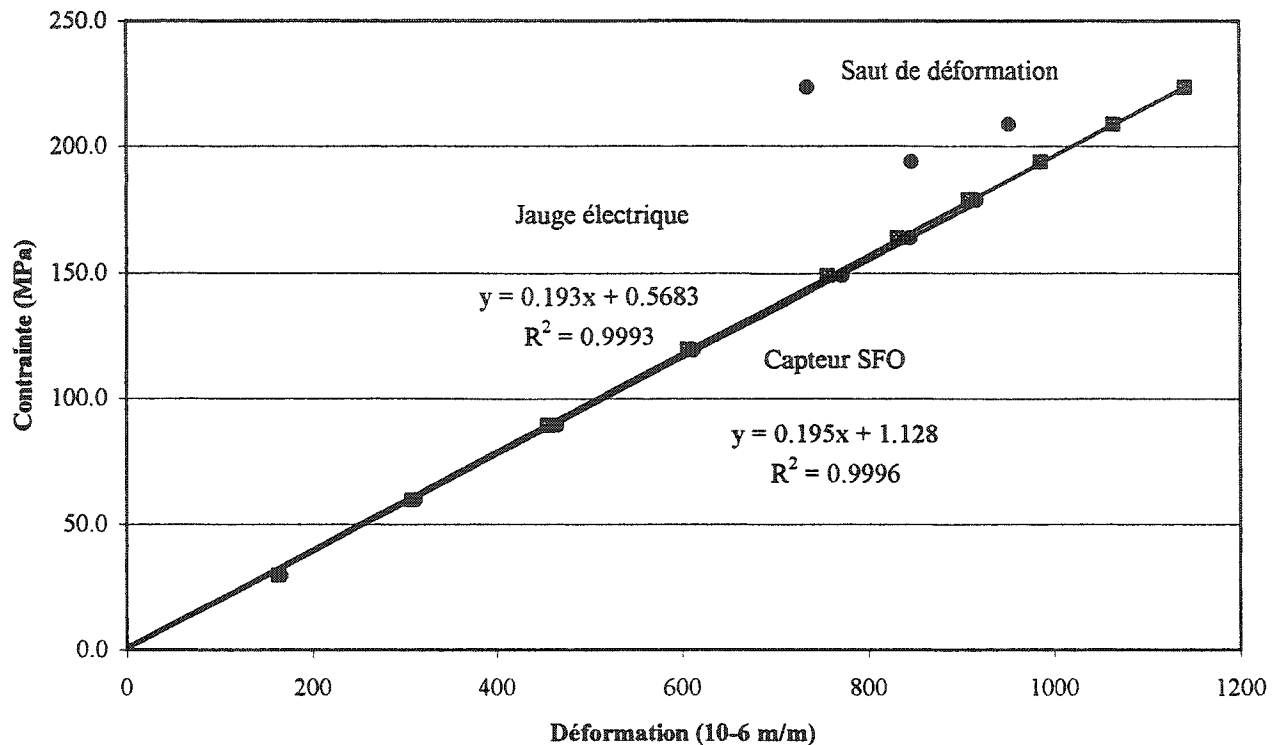


Figure 5.14 Essais de traction sur acier avec capteur SFO 100 1287 et J.E.

La figure 5.14 présente le 3^e chargement effectué sur la barre d'armature en acier instrumentée avec le capteur SFO 100 1287 et une jauge électrique. Les résultats obtenus avec cet échantillon sont présentés au tableau 5.5. Lors des trois chargements, le calcul des modules d'élasticité a donné des valeurs variant de 191 200 à 196 900 MPa pour le capteur SFO et de 193 800 à 201 200 MPa pour la jauge électrique. Les écarts entre le capteur SFO et la jauge électrique varient au cours de ces trois chargements entre -2,1 et -1,0 %. Les essais ont été arrêtés sur cet

échantillon après le 3^e chargement en raison de l'apparition d'un saut de déformation à $917 \mu\epsilon$ obtenu avec le capteur SFO. Les lectures renvoyées par la jauge électrique sont demeurées constantes lors du saut de déformation.

Le capteur à fibre optique SFO No 100 1401 qui a été collé sur la troisième barre d'armature en acier n'a pas fourni de résultats pouvant être comparés à ceux du capteur à fibre optique de type réseau de Bragg fixé à la même barre. Le capteur SFO, suite aux manipulations du collage, a probablement été comprimé de sorte qu'il est sorti de sa plage de fonctionnement normal. Au moment de débiter l'essai, le poste de lecture affichait une valeur de 7 505 nm. Cette valeur se retrouve à l'extérieur de la plage de fonctionnement du poste de lecture qui est comprise entre 8 000 et 24 000 nm. Les résultats provenant de ce capteur n'ont donc pas été retenus. Par contre les résultats obtenus avec le capteur de type réseau de Bragg sont présentés à la figure 5.15 où l'on voit le cinquième chargement suivi d'une déformation plastique permanente.

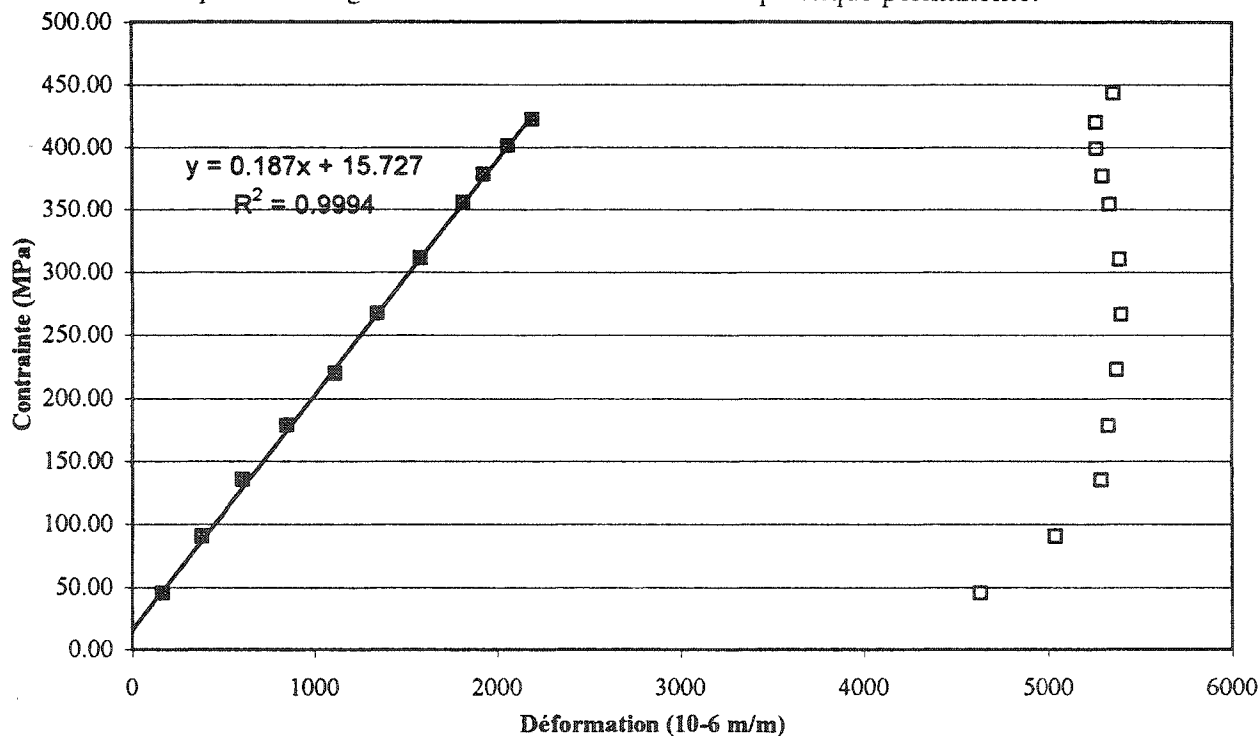


Figure 5.15 Essais de traction sur acier avec capteur Bragg 00720

5.1.2.4 Échantillons provenant d'un treillis en PRFC Nefmac

Les derniers essais de traction ont été réalisés sur des échantillons provenant d'un treillis d'armature en PRFC de type Nefmac. Deux échantillons ont été instrumentés avec un capteur SFO et une jauge électrique. Les échantillons ont été coupés de manière à ce qu'il n'y ait qu'une section qui reprenne la charge de traction. La figure 5.16 montre ces deux échantillons. Les résultats obtenus sont présentés aux figures 5.17 et 5.18 ainsi qu'au tableau 5.6. Contrairement aux autres échantillons testés en traction qui possèdent une section circulaire, la portion du treillis de PRFC est de section rectangulaire. La section transversale moyenne a été évaluée au laboratoire en faisant la moyenne de dix portions du treillis prises séparément. La section moyenne calculée et utilisée pour le calcul de la contrainte est de 39 mm^2 .

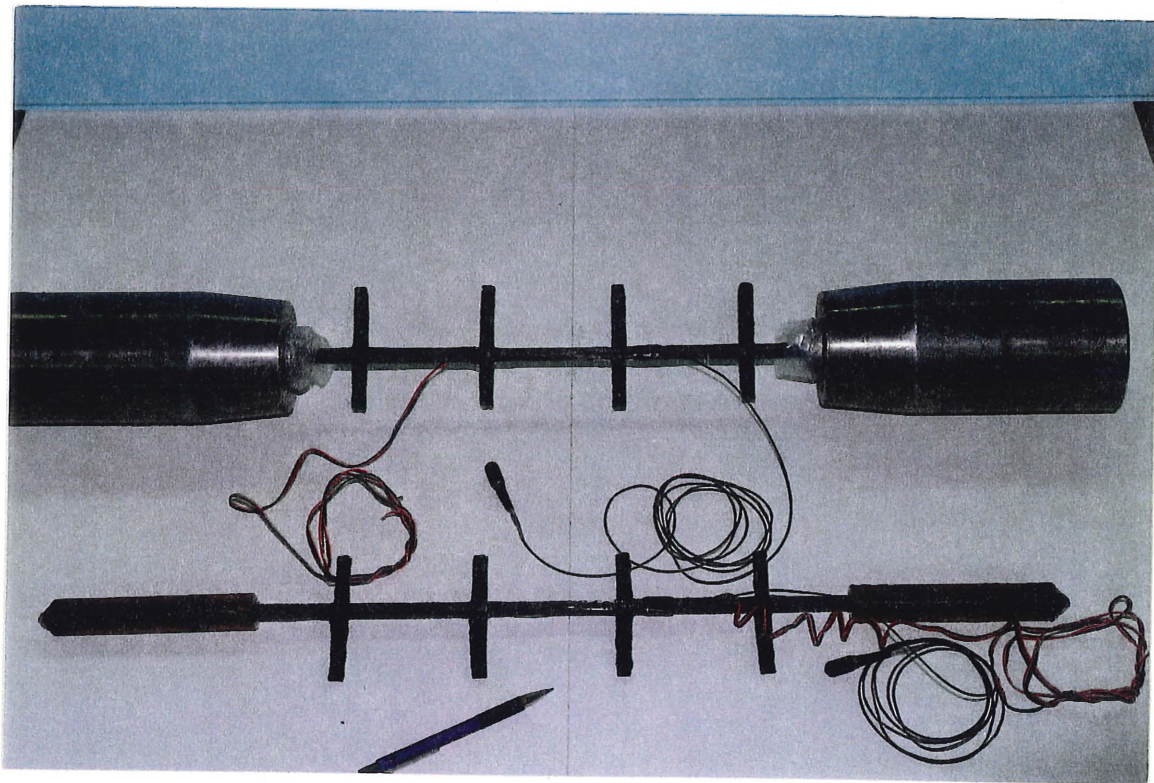


Figure 5.16 Échantillons de treillis Nefmac soumis aux essais de traction

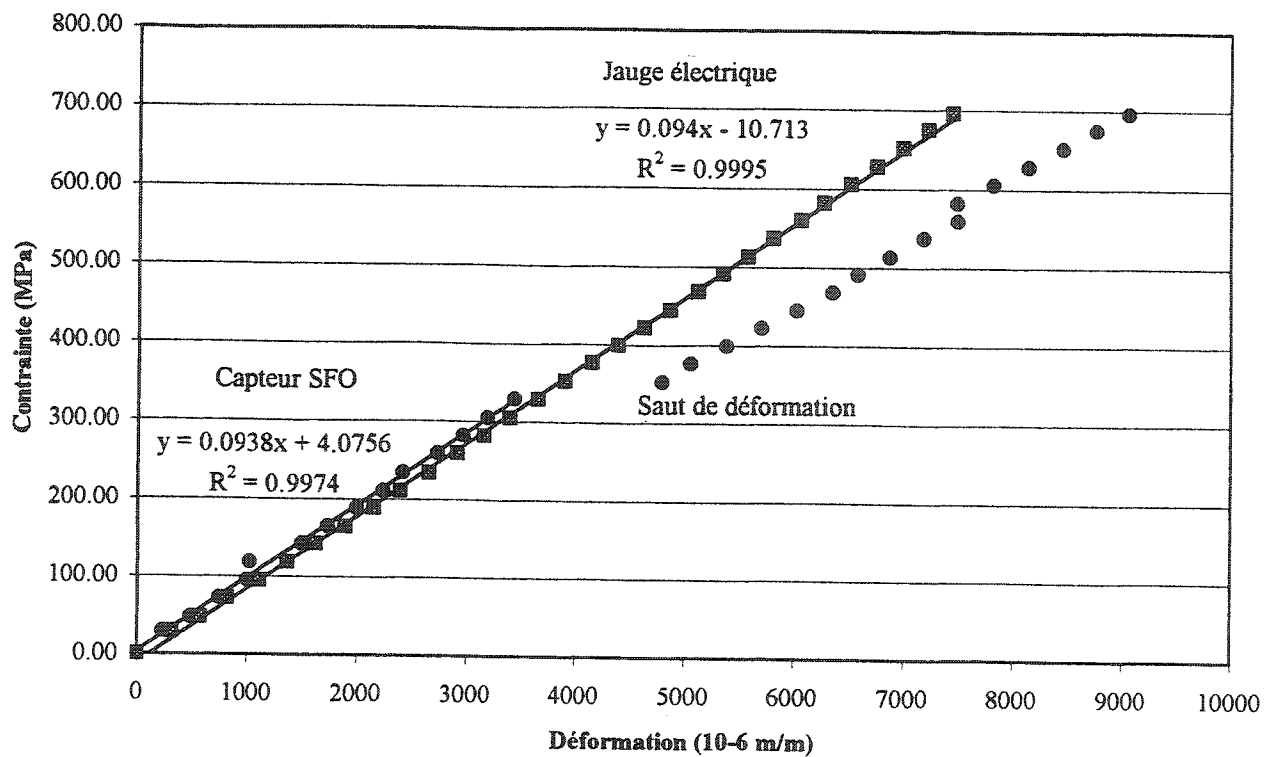


Figure 5.17 Essais de traction sur échantillons de treillis Nefmac avec capteur SFO 100 1382 et J.E.

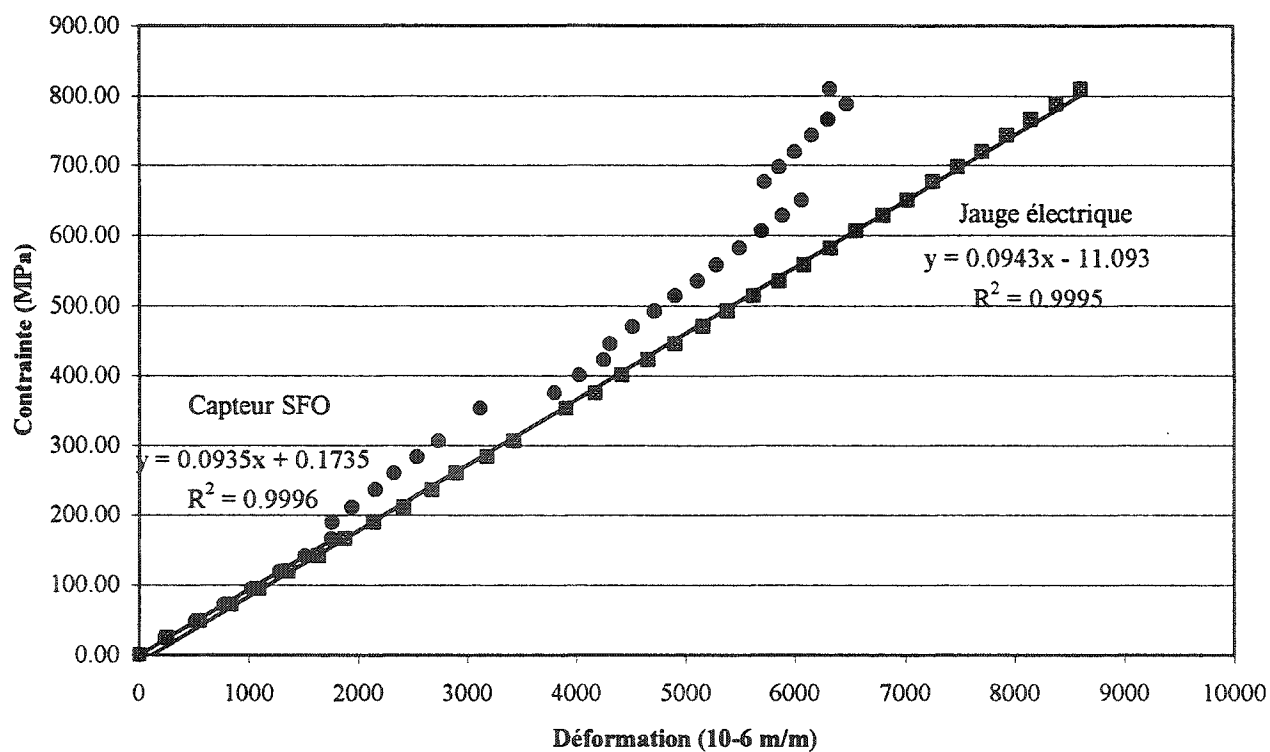


Figure 5.18 Essais de traction sur échantillons de treillis Nefmac avec capteur SFO 100 1376 et J.E.

TABLLAU 5.6 RESULTATS OBTENUS AVEC LES ÉCHANTILLONS PROVENANT DU TREILLIS D'ARMATURE EN PRFC DE TYPE NEFMAC

No. capteur SFO	Chargement	Module d'élast. SFO [MPa] (coef. rég. lin.)	Module d'élast. J.E. [MPa] (coef. rég. lin.)	Comparaison (%)
100 1382	1 ^{er}	93 800 (0,9974)	94 000 (0,9995)	-0.2
100 1376	1 ^{er}	93 900 (0,9996)	94 300 (0,9995)	-0.4

Les figures 5.17 et 5.18 présentent les chargements effectués sur les deux échantillons provenant du treillis d'armature en PRFC de type Nefmac. Le calcul des modules d'élasticité expérimentaux obtenus avec les capteurs SFO et avec les jauges électriques présentent de très faibles écarts entre eux. Ces écarts entre les capteurs SFO et leurs jauges électriques correspondantes sont de -0.2% pour le capteur 100 1382 et de -0,4% pour le capteur 100 1376. Les modules d'élasticité obtenus varient entre 93 800 à 94 300 MPa. Des sauts de déformations sont survenus à 3 444 et à 1 746 $\mu\epsilon$ respectivement pour les capteurs 100 1382 et 100 1376. Les lectures renvoyées par les jauges électriques sont demeurées constantes lors des sauts de déformation. Les essais ont été arrêtés après les premiers chargements sur ces deux échantillons.

5.1.2.5 Cylindre de béton

Un essai de résistance à la compression a été réalisé sur un cylindre de béton haute résistance de 100 mm de diamètre par 200 mm de hauteur. Le cylindre a été instrumenté avec un capteur à fibre optique SFO (No 100 0730). Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.19. Il est à noter que c'est le seul essai de résistance à la compression qui a été réalisé au cours de ces travaux.

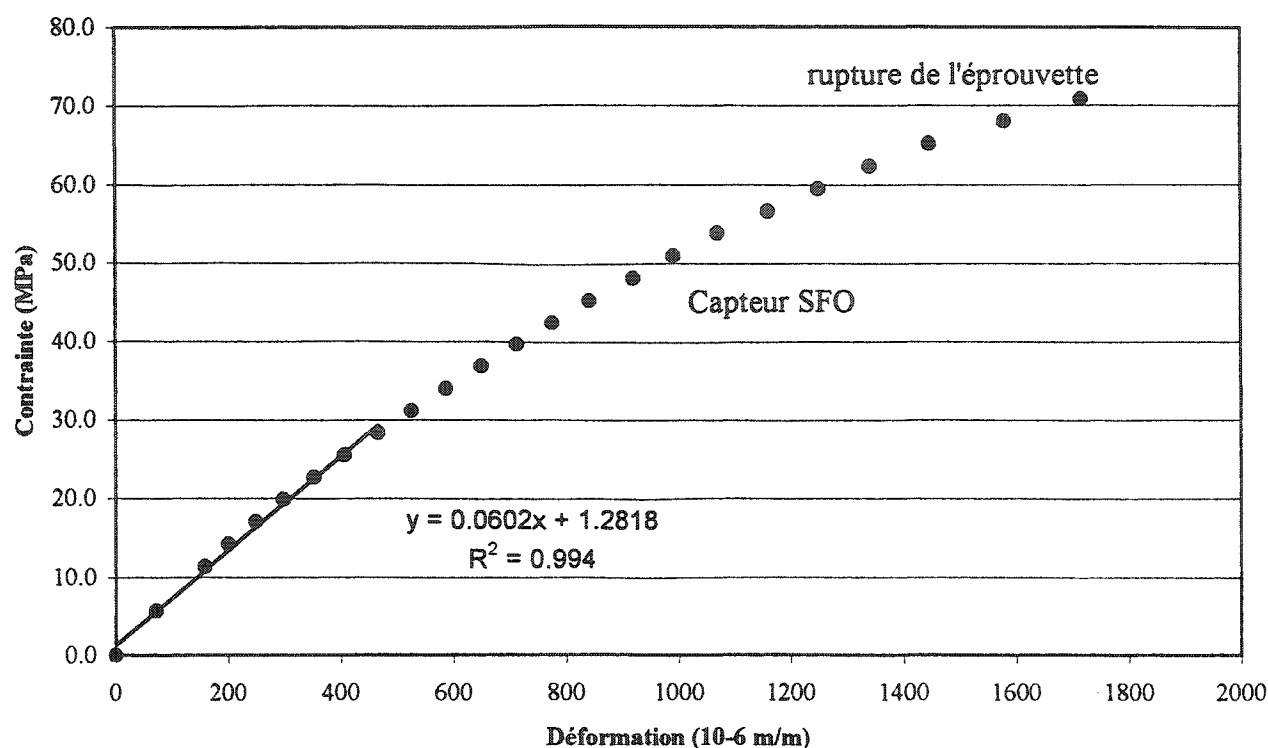


Figure 5.19 Essai de compression sur éprouvette de béton avec capteur SFO 100 0730

La figure 5.19, qui illustre le chargement en compression de l'éprouvette cylindrique de béton, montre un comportement constant jusqu'à la rupture. La rupture a eu lieu à une contrainte de 70.8 MPa et à une déformation de 1 718 $\mu\epsilon$. La détermination du module d'élasticité expérimental a été réalisé par la méthode de la régression linéaire appliquée au neuf premiers points du graphique, ce qui correspond à 40 % de la charge de rupture. Aucune irrégularité n'a été décelée lors de cet essai. Il est à noter à titre indicatif seulement que même après la rupture de l'éprouvette cylindrique, le capteur SFO est demeuré fonctionnel. En effet, lors de la rupture un éclat de béton s'est détaché du cylindre entraînant avec lui le capteur et ce, sans l'endommager.

5.2 Dalle armée avec un treillis en PRFC Nefmac C19

5.2.1 Mûrissement de la dalle de béton

Le mûrissement de la dalle de béton a été suivi avec les quatre capteurs à fibre optique ainsi qu'avec le thermocouple. La figure 5.20 présente le graphique des déformations enregistrées par les capteurs à fibre optique ainsi que les températures données par le thermocouple, ces deux paramètres étant exprimés en fonction du temps. Les capteurs à fibre optique ont été interrogés à intervalles réguliers (à toutes les 2 minutes) grâce à un ordinateur portable tandis que pour le thermocouple, les lectures étaient recueillies manuellement. Cette prise de données effectuée manuellement n'a pas permis une répartition uniforme des lectures qui ont été collectées sur une période de plus de 24 heures.

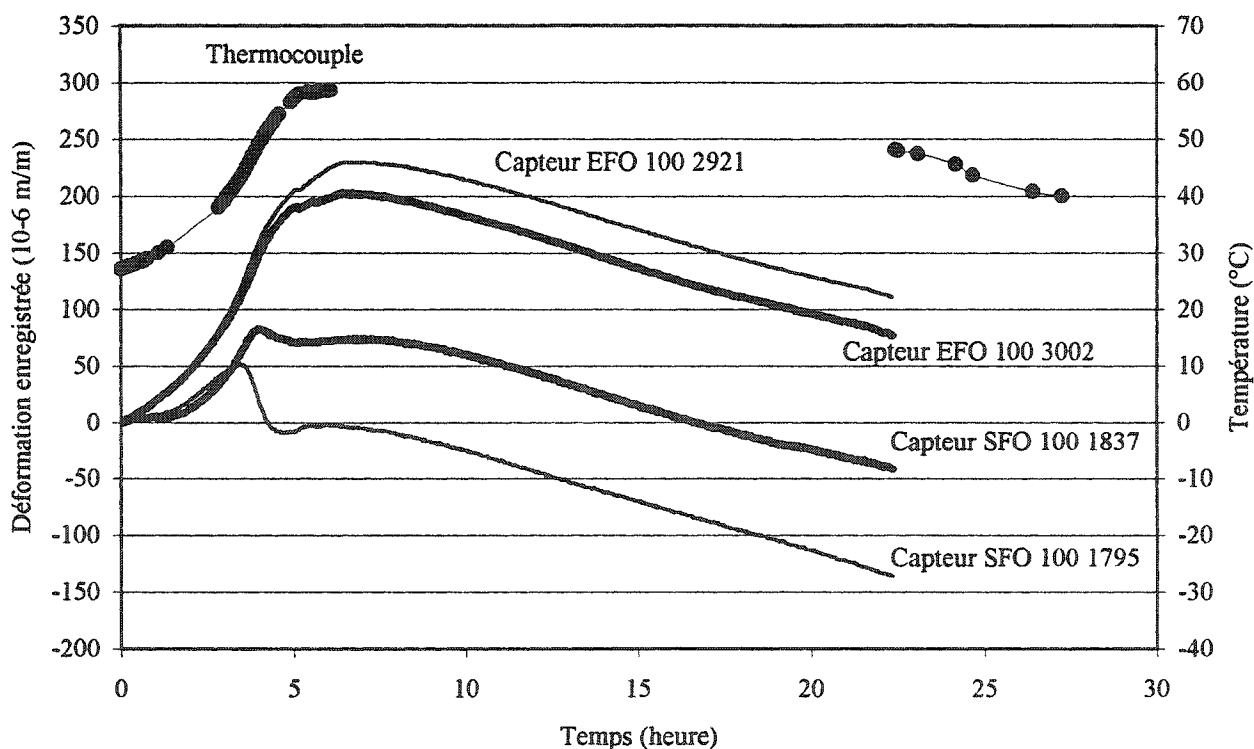


Figure 5.20 Mûrissement de la dalle de béton armée avec le treillis Nefmac C19

Il peut être remarqué sur ce graphique que les capteurs de type EFO ont une plus grande sensibilité, au départ, à la variation de température que les capteurs de type SFO collés sur l'armature. Ceci peut s'expliquer par un plus grand coefficient de dilatation thermique du tube d'acier (dans lequel est collé le capteur à fibre optique) des capteurs EFO comparé au coefficient de dilatation thermique de l'armature Nefmac. En effet, lors de l'élévation de température du béton à l'état frais, les éléments placés à l'intérieur de la masse de béton sont libres de se déformer. Cette déformation est possible parce que le béton n'a pas encore développé une résistance suffisante pour empêcher les mouvements de ces éléments.

Par la suite, lorsque la prise s'effectue et que le béton acquiert une résistance suffisante, il devient en mesure d'influencer les éléments qui lui sont rattachés. Ce sont les capteurs SFO collés sur l'armature Nefmac qui sont les premiers à montrer des signes suggérant un gain de résistance suffisant du béton lui permettant ainsi de restreindre les mouvements d'éléments internes. Une diminution des valeurs de déformation enregistrées pour ces deux capteurs survient environ 4 heures après le bétonnage malgré une température qui continue d'augmenter. Cette diminution pourrait probablement être imputée au retrait du béton qui provoque une compression dans l'armature. La compression est décelée dans l'armature à ce stade du mûrissement avec les capteurs SFO mais ne l'est pas avec les capteurs EFO. La géométrie particulière (croisements formés dans le treillis) de l'armature Nefmac permet sans doute au béton d'y exercer plus hâtivement son influence que sur les capteurs EFO.

5.2.2 Essais cycliques sur la dalle de béton armé de PRFC

Un programme de chargement de quatre millions de cycle a été réalisé sur la dalle armée avec le composite en fibres de carbone. Préalablement à ces chargements, trois chargements statiques ont été effectués comme il est présenté sur la figure 5.21. Cette figure présente les résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique.

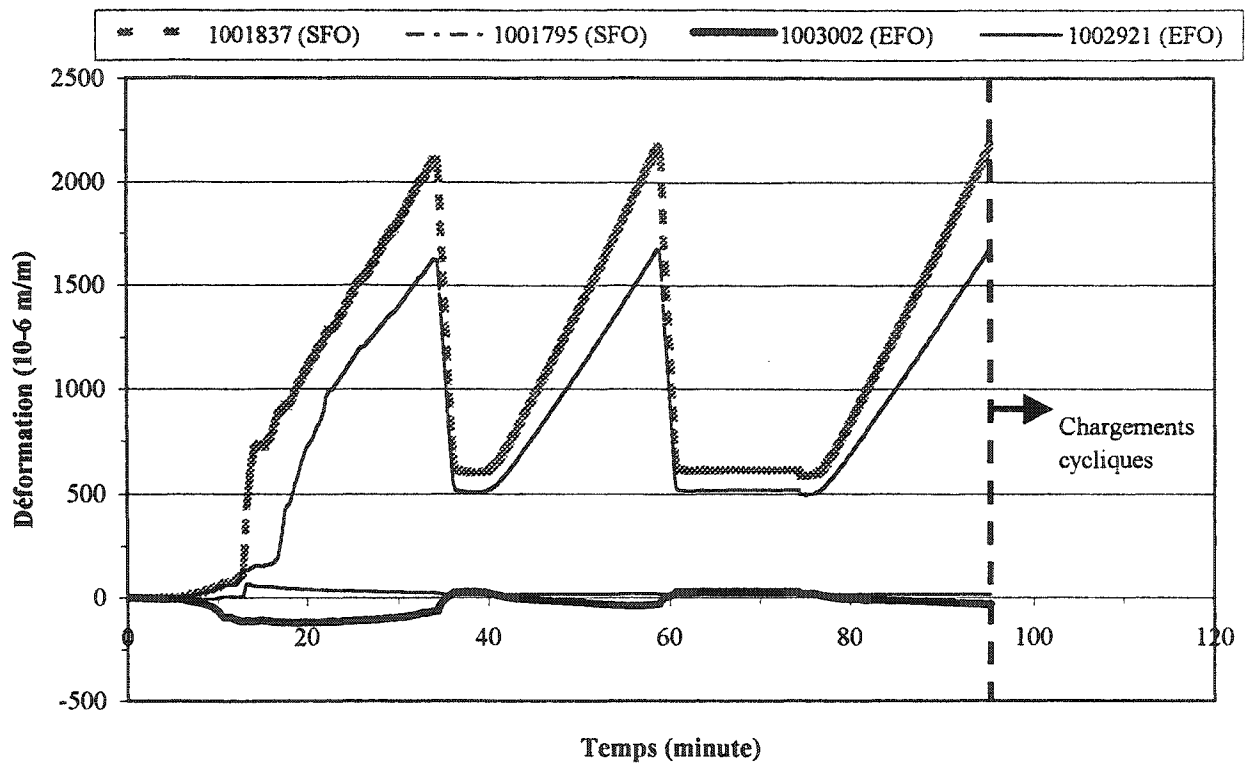


Figure 5.21 Chargements statiques appliqués avant les chargements cycliques

Les chargements cycliques se sont déroulés en deux étapes. Au cours de la première étape, deux millions de cycles ont été imposés à une fréquence de 2 Hertz (2 cycles par seconde). Par la suite, la fréquence des chargements a été augmentée à 3 Hertz (3 cycles par seconde) jusqu'à la fin des essais cycliques.

Un système d'acquisition de données a fonctionné pendant toute la durée de l'essai et a recueilli des lectures provenant du LVDT du vérin, des fissuromètres et des jauges électriques. Le suivi des jauges à fibre optique a été fait, à intervalles réguliers, en reliant le poste de lecture à un ordinateur portable. Chacune des quatre jauges à fibre optique était ainsi interrogée sur une période de dix secondes à raison de 100 lectures/seconde. Seulement les résultats concernant les capteurs à fibre optique sont présentés dans ce rapport. Les figures 5.22 à 5.27 présentent les résultats obtenus respectivement après 300 cycles, 2 millions de cycles et 4 millions de cycles.

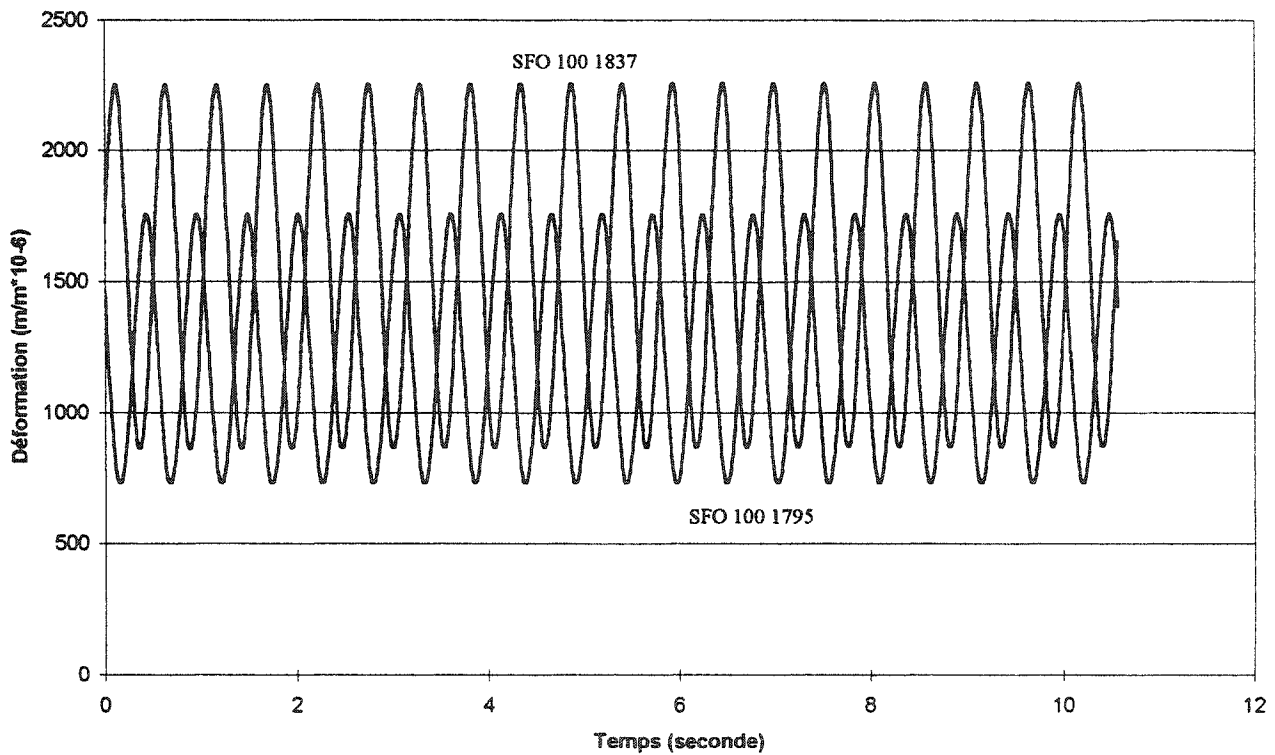


Figure 5.22 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 300 cycles de chargement

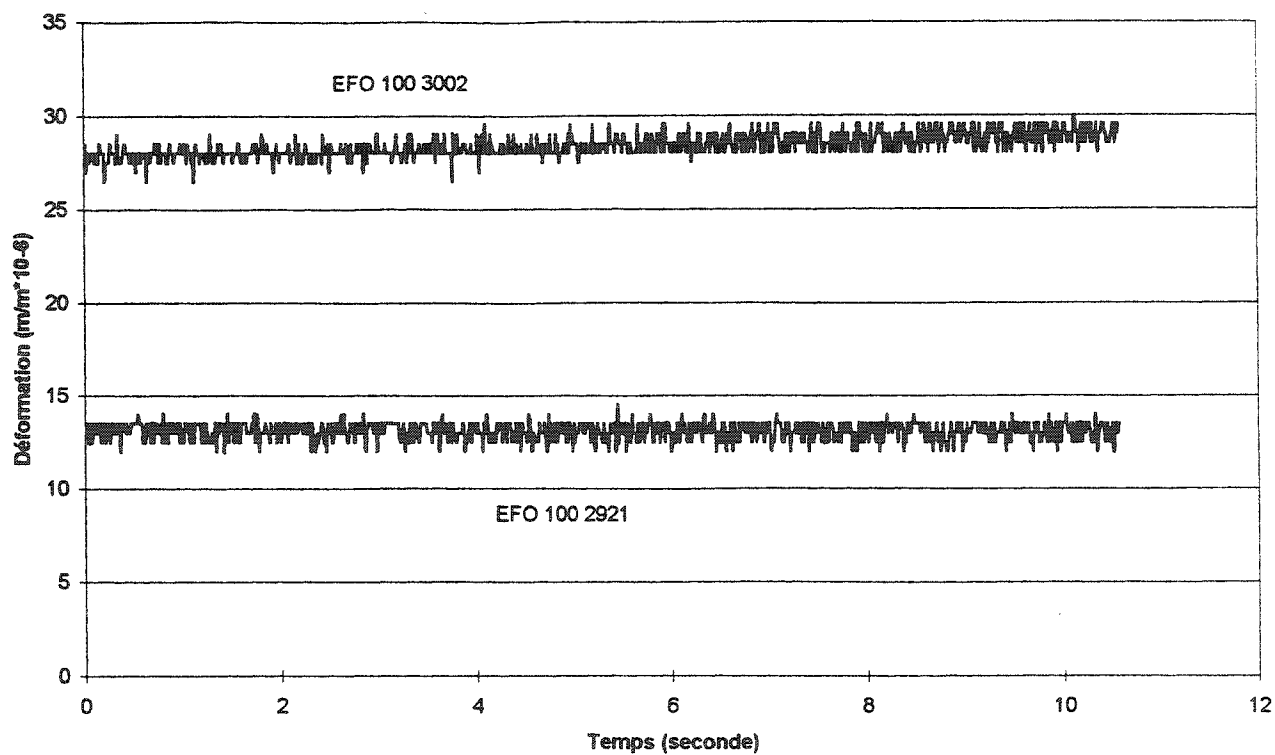


Figure 5.23 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 300 cycles de chargement

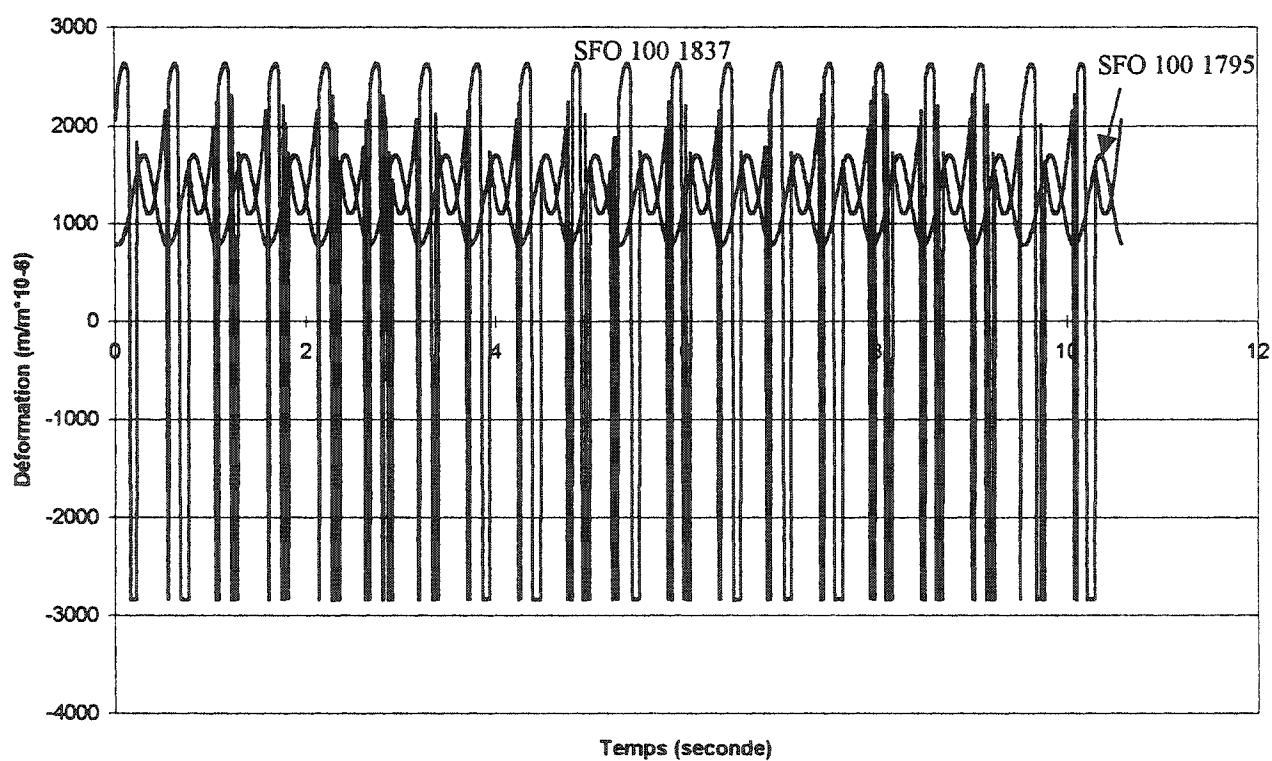


Figure 5.24 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 2M de cycles de chargement

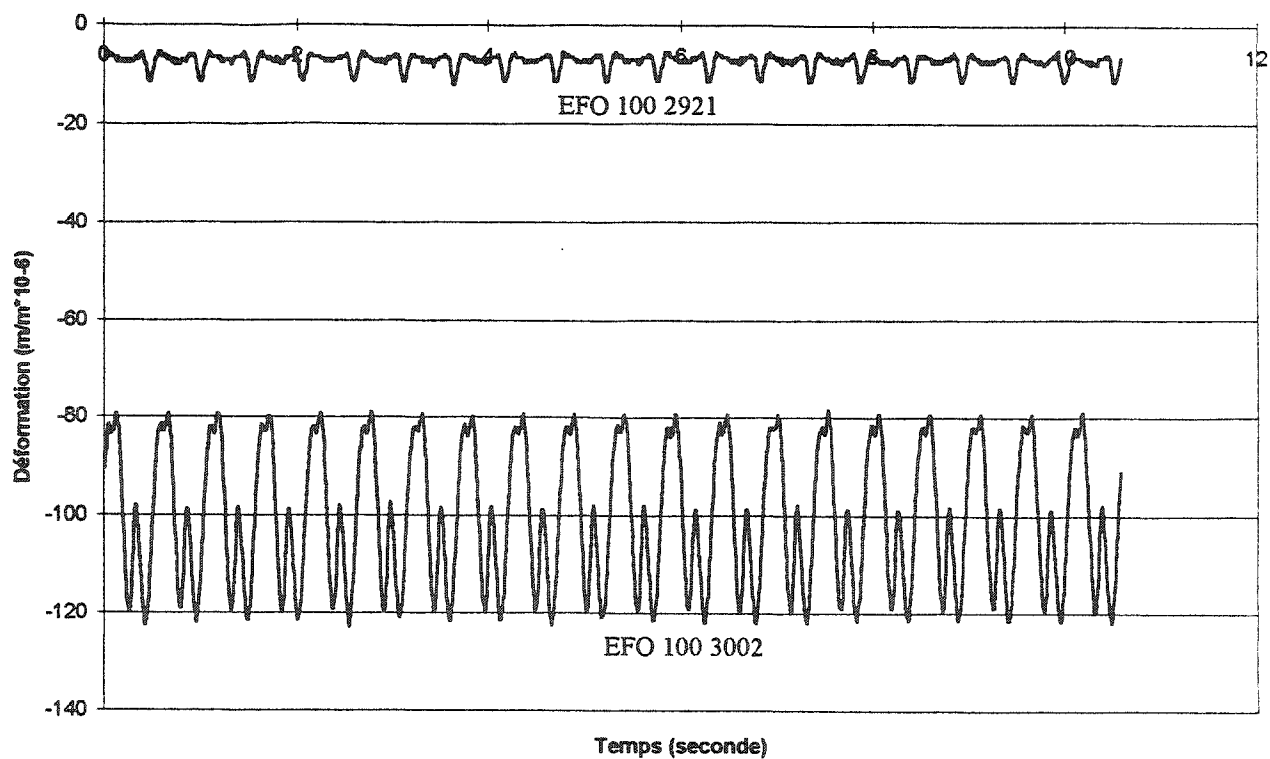


Figure 5.25 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 2M de cycles de chargement

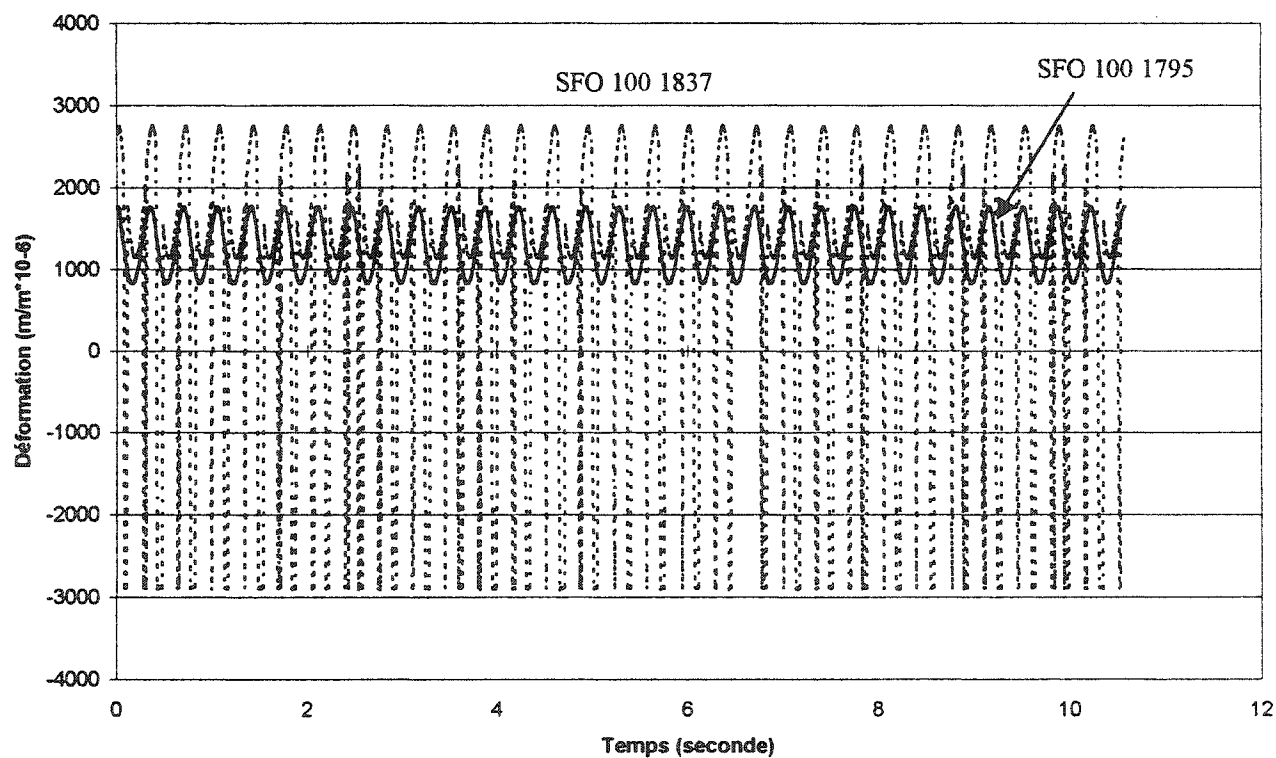


Figure 5.26 Résultats obtenus avec les capteurs SFO après 4M de cycles de chargement

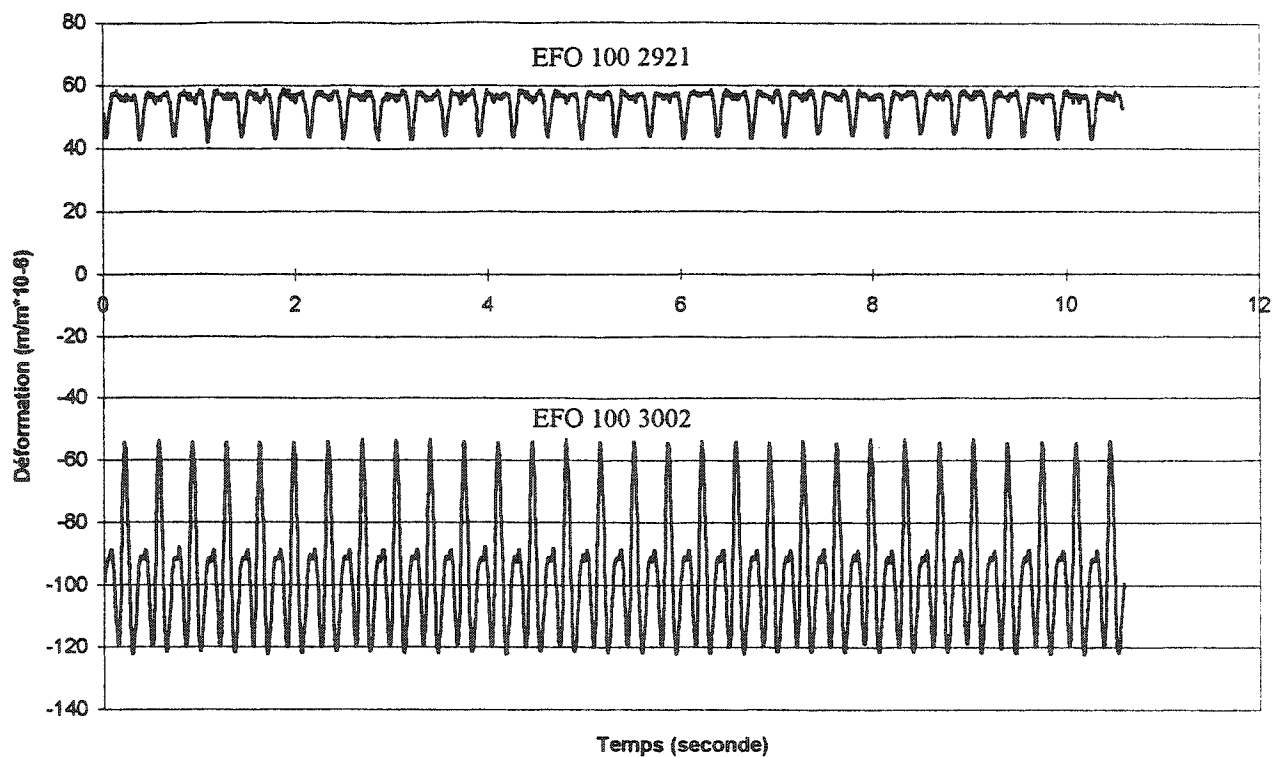


Figure 5.27 Résultats obtenus avec les capteurs EFO après 4M de cycles de chargement

L'observation des figures 5.22 à 5.27 et l'analyse des résultats provenant des capteurs à fibre optique permettent de déceler certaines irrégularités. Tout d'abord, après environ 2 millions de cycles, le capteur SFO 100 1837 (collé sur l'armature en PRFC) a commencé à renvoyer des lectures anormales. En effet, à chacun des cycles, le poste de lecture enregistrait des valeurs de déformation excessivement basses lors du chargement aussi bien que lors du déchargement. Ce phénomène peut être observé sur les figures 5.24 et 5.26. Afin de vérifier la source des lectures erronées, à savoir si elles provenaient de la jauge SFO 100 1837 elle-même ou du poste de lecture, un essai de comparaison entre le poste de lecture de l'Université de Sherbrooke et un poste de lecture de référence a été réalisé. Les détails de cette vérification figurent à la sous-section suivante.

Une autre irrégularité a été notée mais dans ce cas-ci elle concerne les deux capteurs EFO. Sur les figures 5.25 et 5.27, les lectures enregistrées avec les deux jauges EFO ne suivent pas un

patron de déformations sinusoïdal régulier. En effet, à partir d'un million de cycles, la jauge 100 3002 montre des maximums secondaires entre chacun des maximums principaux. De son côté, la jauge 100 2921 montre des minimums distincts, mais les maximums sont perdus dans une sorte de bruit de fond. L'essai de comparaison planifié pour le capteur 100 1837 a donc aussi servi à la vérification de ce comportement irrégulier.

5.2.3 Essais comparatifs

Les essais comparatifs sur les jauges à fibre optique ont été réalisés après que la dalle ait subi ses 4 millions de cycles de chargement. Avant d'amener la dalle à la rupture, comme cela était prévu suite aux 4 millions de cycles, il a été décidé de rajouter environ 275 000 cycles pour permettre de faire les essais de comparaison. Les figures 5.28 à 5.31 présentent les résultats de ces essais comparatifs.

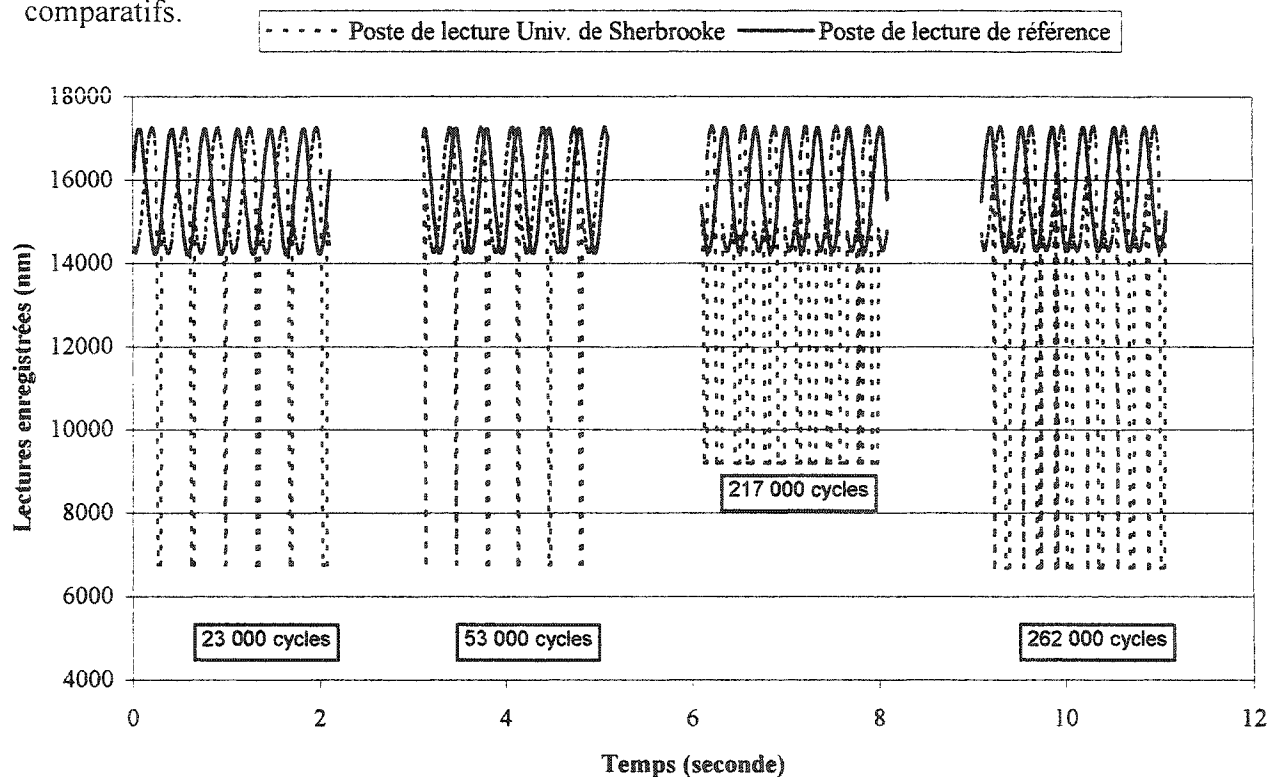


Figure 5.28 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 1837

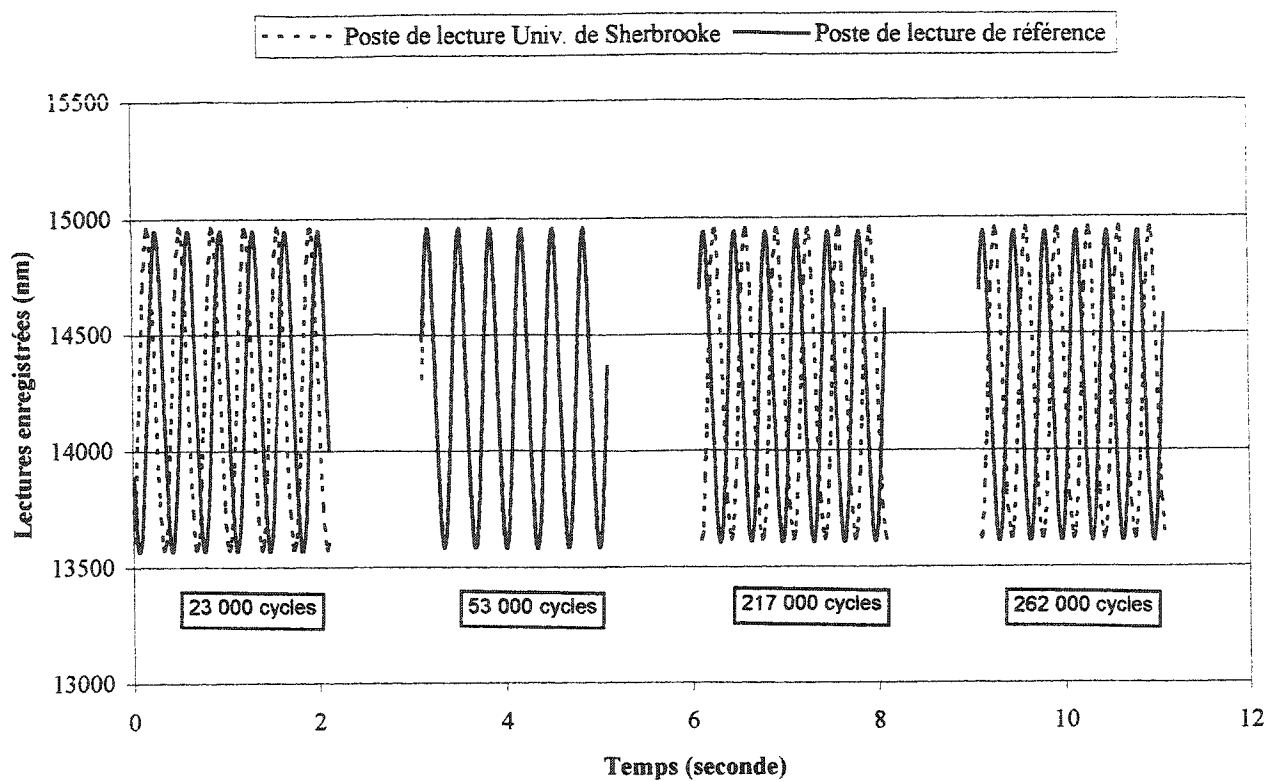


Figure 5.29 Essais comparatifs sur le capteur SFO 100 1795

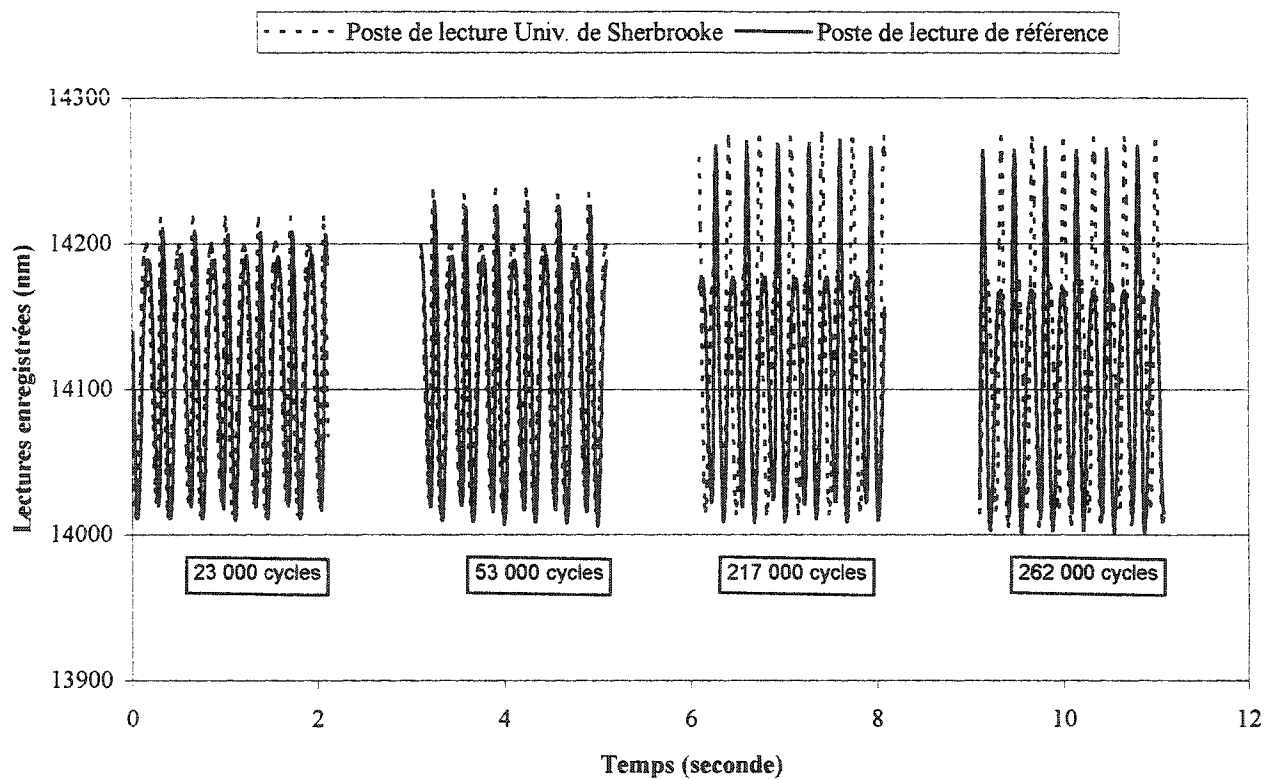


Figure 5.30 Essais comparatifs sur le capteur EFO 100 3002

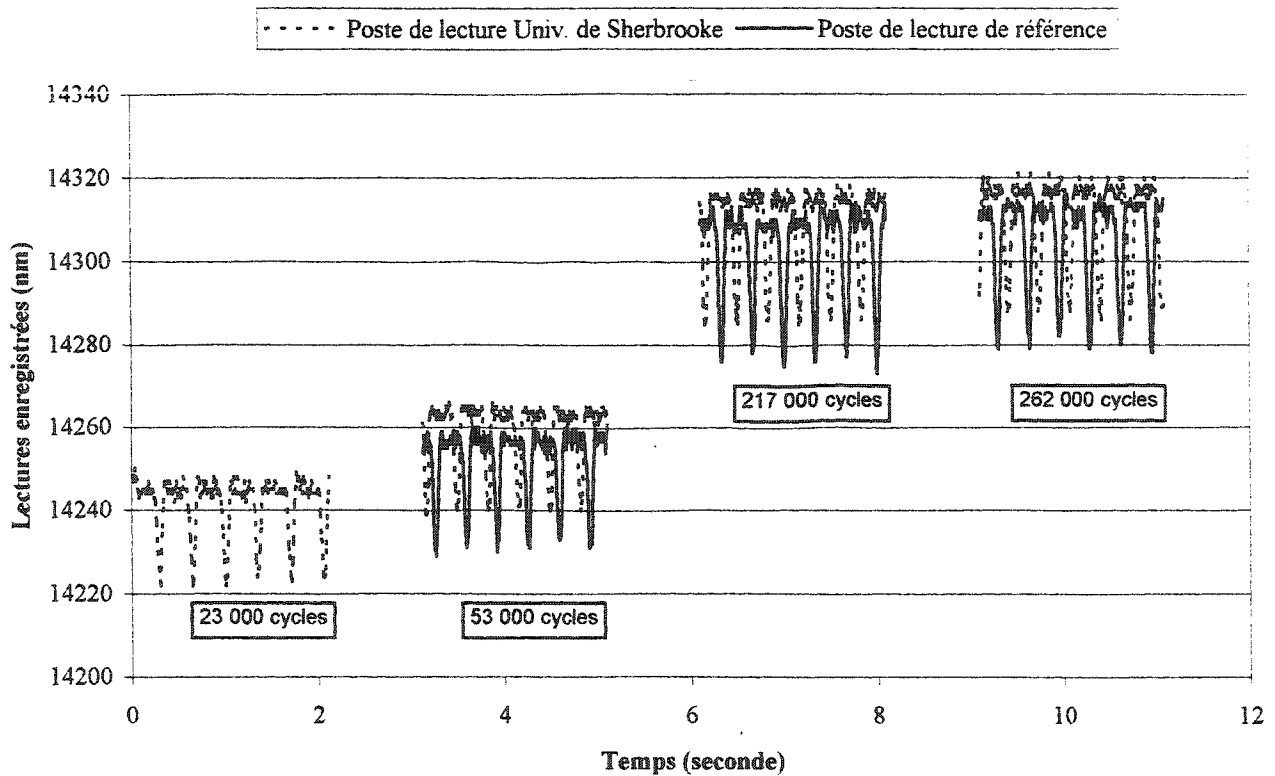


Figure 5.31 Essais comparatifs sur le capteur EFO 100 2921

Sur ces figures, les deux premières séries de lectures (23 000 et 53 000 cycles) ont été obtenues avec l'ordre de branchement suivant pour le poste de lecture de l'Université de Sherbrooke: le capteur 100 1837 dans le canal 1, le capteur 100 1795 dans le canal 2, le capteur 100 3002 dans le canal 3 et le capteur 100 2921 dans le canal 4. Les deux autres séries de lectures (217 000 et 262 000 cycles) ont été obtenues avec le capteur 100 1837 dans le canal 2, le capteur 100 1795 dans le canal 1, le capteur 100 3002 dans le canal 4 et le capteur 100 2921 dans le canal 3. En ce qui concerne le poste de lecture de référence, l'ordre de branchement était continuellement changé car il n'y avait que 3 canaux sur 4 qui étaient opérationnels lors de ces essais.

La première vérification, qui portait sur le capteur SFO 100 1837, a permis de mettre en lumière les faits suivants d'après l'examen de la figure 5.28: 1) le poste de lecture de l'Université de Sherbrooke fourni des lectures erronées de la jauge 100 1837 alors que la même jauge, branchée

dans le poste de lecture de référence, donne des lectures qu'on pourrait qualifier de normales; 2) ce phénomène se produit également lorsque le capteur 100 1837 est branché dans un autre canal du poste de lecture; 3) le phénomène varie d'intensité c'est-à-dire que le nombre de lectures erronées ainsi que l'amplitude de ces lectures varient lorsque le capteur est transféré d'un canal à l'autre. Suite à ces résultats, le poste de lecture a été envoyé chez le fabricant pour vérification et nettoyage.

La deuxième vérification, qui concerne les capteurs de type EFO, a été accomplie en faisant l'analyse des figures 5.30 et 5.31. La superposition, à quelques nanomètres près, des courbes obtenues avec les deux postes de lecture élimine la possibilité que ce soit le poste de lecture de l'Université de Sherbrooke qui soit la cause des irrégularités observées. Deux autres hypothèses ont été émises concernant ces profils de déformation irréguliers: 1) un effet du montage qui provoquerait des vibrations ou des impulsions secondaires lors des transitions charge-décharge et 2) une mauvaise réponse de la jauge. L'analyse des résultats provenant des autres jauges installées sur la dalle, notamment les jauges électriques, pourrait peut-être apporter certaines réponses supplémentaires mais ces données n'ont pas été traitées dans le cadre de ce projet.

5.3 Intégration en industrie dans des barres d'armature en PRFV

5.3.1 Première expérimentation

Un choix de configuration de capteur devait être fait pour la première expérimentation. Ce choix a été réalisé en prenant en considération, 1) les conditions et contraintes industrielles liées au procédé de pultrusion, 2) l'expérience du fabricant des capteurs à fibre optique et

3) quelques résultats provenant de la littérature. De plus, de manière à minimiser l'effet d'inclusion d'un corps étranger dans le milieu hôte formé par la résine et les fibres de verre, le capteur devait être le plus petit possible pour ne pas compromettre l'intégrité structurale de l'élément.

En se basant sur ces considérations, cinq capteurs ont été fabriqués dans le but d'être intégrés. La configuration de ces capteurs, choisie initialement, consiste en une fibre optique multimode de 125 μm de diamètre recouverte d'une gaine mécanique de polyimide d'une épaisseur de 12,5 μm . Le microcapillaire, d'un diamètre de 200 μm et d'une longueur de 10 mm à l'intérieur duquel la cavité Fabry-Pérot est constituée, est positionné à l'extrémité de la fibre optique. L'autre extrémité de la fibre optique était recouverte d'un tube de téflon sur environ 30 cm. Ceci a été réalisé de manière à pouvoir récupérer facilement la fibre optique pour la brancher au poste de lecture. De plus, les capteurs ont été fabriqués de sorte que l'ouverture de la cavité Fabry-Pérot soit à mi-chemin (16 000 nm) entre les ouvertures minimale (8 000 nm) et maximale (24 000 nm).

La longueur de l'ensemble de l'élément intégré, du bout de la fibre optique protégée par le tube de téflon jusqu'au bout du microcapillaire, faisait environ deux mètres. Lors de la première tentative d'intégration, ce sont cinq capteurs de ce type qui ont été utilisés. Il est à noter qu'à cette période, le partenaire industriel fabriquait uniquement des tiges de section semi-circulaire, donc l'expérimentation a eu lieu sur des tiges ayant cette géométrie particulière. Après avoir procédé à l'intégration de manière manuelle telle que décrit au chapitre précédent, les tiges ont été coupées et apportées en laboratoire afin de dégager les fibres optiques. Grâce au tube de téflon, il était

facile, bien que les manipulations étaient relativement longues, de dégager la fibre optique et d'y poser un connecteur. Après avoir été posé, le connecteur a été branché à un oscilloscope et au poste de lecture afin de vérifier si les capteurs renvoyaient un signal.

Sur les cinq capteurs intégrés lors de cette tentative, trois capteurs renvoyaient un signal optique modulé mais l'intensité de ce signal était très faible sur l'oscilloscope. Il a été nécessaire pour obtenir ce signal d'appliquer un gel optique aux connecteurs pour éliminer les réflexions parasites. Ces trois capteurs ont par la suite été branchés au poste de lecture et un seul pouvait être interrogé et fournir en retour un signal. Les deux autres capteurs, lorsqu'ils étaient branchés, renvoyait un message d'erreur en raison du manque d'intensité du signal optique.

Il a été remarqué lors de l'inspection des échantillons que la fibre optique, bien qu'elle ait été insérée au milieu des fibres de verre, ne demeurait pas au centre de l'élément fabriqué. Des coupes transversales des tiges montrent que sa position varie de façon quasi-aléatoire. On la retrouve parfois au milieu, plus en périphérie ou même carrément en surface de la tige en PRFV.

En plus de cette inspection visuelle des échantillons, une investigation au microscope électronique à balayage (MEB) a été effectuée. Cette investigation a été réalisée dans le but d'observer l'arrangement des fibres de verre et de la résine vinylester autour des fibres optiques dans le cas d'une intégration en milieu industriel. Des coupes transversales aléatoires des tiges intégrées ont permis d'observer la distribution des fibres et de la résine autour de la fibre optique. Les figures 5.32 et 5.33 présentent deux coupes transversales types de ces échantillons.

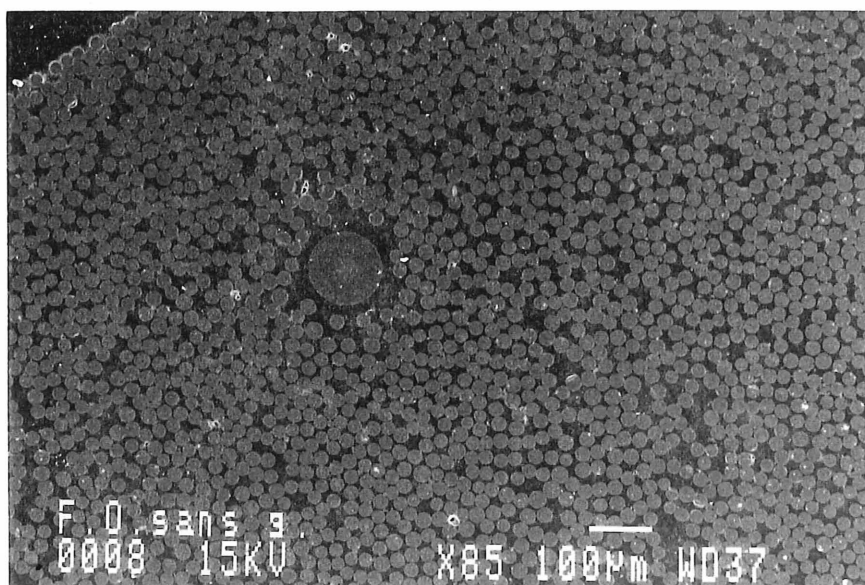


Figure 5.32 Section transversale d'un élément de PRFV avec un capteur à fibre optique SFO intégré (grossissement = 85X)

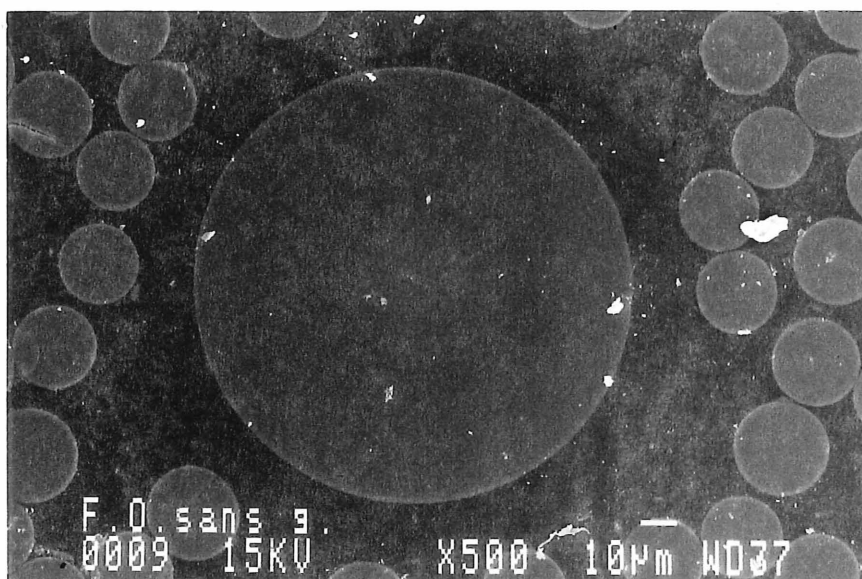


Figure 5.33 Interface entre le capteur à fibre optique SFO et le PRFV (grossissement = 500X)

L'observation de la figure 5.32 permet de voir que le capteur à fibre optique est environ cinq fois plus gros que les fibres de verre. Il est aussi possible de voir sur cette figure comment se fait la répartition des fibres autour du capteur. La figure 5.33 permet, quant à elle, d'observer les trois parties qui composent la fibre optique soient: le cœur, la gaine optique et la gaine mécanique de polyimide. Plusieurs fibres de verre semblent être en contact avec la gaine mécanique. Les zones riches en résine sont donc rares et ceci favorise la bonne performance de l'élément fabriqué. De plus, l'interface polyimide/résine semble être de bonne qualité étant donné l'absence de vides et de micro-fissures.

Suite à cette première expérimentation, certaines hypothèses ont été énoncées pour tenter d'expliquer les résultats obtenus. La première hypothèse concerne le bris possible de certains des capteurs lors du processus d'intégration. En effet, il a été remarqué que l'arrangement du système d'alimentation en fibres de verre induit un mouvement, qui pourrait être qualifié de turbulence, à l'entrée de la chambre de pultrusion. Cette turbulence pourrait entraîner le "désalignement" du capteur et ainsi favoriser le bris de celui-ci. Cette hypothèse peut seulement convenir aux capteurs qui ne renvoient aucun signal optique modulé. Car les capteurs qui renvoient un signal optique modulé ont nécessairement une jauge fonctionnelle. La turbulence observée pourrait aussi expliquer les variations de position des fibres optiques tout au long de l'élément fabriqué.

La deuxième hypothèse a été formulée en prenant en considération les éléments de la première hypothèse à savoir que les capteurs n'étaient probablement pas parfaitement alignés selon l'axe longitudinale de la tige de PRFV. Ceci pourrait avoir comme effet d'augmenter les efforts auxquels les capteurs seraient soumis et par le fait même d'induire des déformations importantes. L'ouverture de la cavité Fabry-Pérot ayant été positionnée à sa valeur médiane, il est possible que

les capteurs subissent des déformations telles que cette cavité devienne ou trop fermée, ou trop ouverte. Dans l'une ou l'autre de ces éventualités, le capteur serait encore fonctionnel mais le signal serait en dehors de la plage de lecture du poste de lecture.

La troisième hypothèse touche la position du capteur le long de la fibre optique. Il est possible que les capteurs positionnés au bout de la fibre optique subissent de plus grandes contraintes que s'ils étaient placés à une certaine distance du bout de la fibre optique.

La quatrième et dernière hypothèse concerne le capteur lui-même et plus précisément le microcapillaire. Le microcapillaire étant soudé par fusion à la fibre optique, il se pourrait que ce lien n'assure pas complètement l'étanchéité et laisse pénétrer la résine vinylester à l'intérieur de la cavité Fabry-Pérot. Ceci pourrait alors entraîner l'affaiblissement de l'intensité du signal et la mise hors d'usage du capteur.

5.3.2 Deuxième expérimentation

En tenant compte des résultats obtenus et des observations réalisées lors de la première étape, certains changements ont été apportés au niveau des capteurs en vue de la deuxième étape. Tout d'abord, les cinq capteurs manufacturés pour cette expérimentation ont été renforcés et scellés afin d'améliorer les chances de réussite de l'intégration. Les microcapillaires ont donc été injectés de résine époxy lors de leur fabrication. De cette façon, les microcapillaires se trouvent plus résistants et leur étanchéité est assurée.

Aussi, deux capteurs sur les cinq ont été positionnés environ au milieu de la fibre optique afin de vérifier si cette position ne leur serait pas plus favorable. Pour réussir à insérer le microcapillaire en milieu de fibre, son extrémité fermée a dû être coupée. De cette manière, le microcapillaire devenait ni plus ni moins qu'un tube pouvant être enfilé autour de la fibre optique. Par la suite, le reste de l'assemblage a été réalisé en soudant par fusion, à ses deux extrémités, le microcapillaire à la fibre optique et en l'injectant de résine époxy comme expliqué précédemment.

La dernière modification concerne l'ouverture de la cavité Fabry-Pérot qui a été réglée différemment pour les cinq capteurs. Suite à la formulation de la deuxième hypothèse (section précédente), les ouvertures de la cavité ont été augmentées en supposant que les capteurs subissent des efforts de compression au cours de leur passage dans la chambre de pultrusion. De plus, lors du refroidissement rapide du PRFV lors du processus de fabrication, la résine exerce des efforts qui se traduisent par une contraction radiale et longitudinale de l'élément. Ces efforts pourraient potentiellement être transmis aux capteurs et ainsi refermer la cavité Fabry-Pérot de sorte que les lectures deviennent irréalisables. Le tableau 5.7 présente la description des capteurs utilisés lors de cette étape.

TABLÉAU 5.7 CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE UTILISÉS LORS DE LA DEUXIÈME ÉTAPE DE L'INTÉGRATION

N° du capteur	Type de gaine méc.	Position du capteur	Ouverture de la cavité F-P (nm)
100 1545	Polyimide (12,5 µm)	Extrémité de la fibre	16 960
100 1553	Polyimide (12,5 µm)	Extrémité de la fibre	19 500
100 1503	Polyimide (12,5 µm)	Extrémité de la fibre	22 000
100 1650a	Polyimide (12,5 µm)	Milieu de la fibre	indéterminée
100 1650b	Polyimide (12,5 µm)	Milieu de la fibre	21 729

La deuxième tentative d'intégration, tout comme la première, a été réalisée sur des tiges en PRFV de section semi-circulaire. Une fois l'intégration terminée, les éléments de PRFV ont été transportés en laboratoire pour permettre le dégagement des fibres optiques et la vérification des signaux optiques.

Un seul des cinq capteurs (100 1650a) a été en mesure de transmettre un signal optique modulé par le capteur. Le gel optique a aussi été nécessaire pour être en mesure de voir le signal sur l'oscilloscope. Donc, les changements apportés lors de cette deuxième tentative n'ont pas permis de solutionner les problèmes liés à l'intégration des capteurs à fibre optique SFO.

5.3.3 Troisième expérimentation

Afin de mieux comprendre pourquoi les capteurs à fibre optique ne résistaient pas au procédé de pultrusion et d'essayer d'identifier la ou les causes provoquant la mise hors d'usage de ceux-ci, il a été décidé de suivre le comportement des capteurs pendant l'intégration. Ceci s'est fait en utilisant le poste de lecture, un oscilloscope et des fibres optiques d'une longueur d'environ 3,5 mètres. De cette manière, il était possible de suivre l'intensité et les variations des signaux transmis par les capteurs lors du passage de ces derniers dans la chambre de pultrusion. Lorsque le capteur se retrouvait intégré à l'intérieur de l'élément de PRFV et ressortait de l'autre côté de la chambre de pultrusion, la fibre optique qui était reliée au poste de lecture grâce à un connecteur temporaire, était déconnectée et intégrée à son tour.

Ce sont donc cinq capteurs situés en bout de fibre qui ont été employés pour cette troisième tentative d'intégration. Une autre modification majeure qu'il est important de spécifier est le

changement de ligne de production. Pour cette expérimentation, le produit fabriqué par le partenaire industriel était une tige circulaire en PRFV. L'intégration et le suivi de celle-ci effectués au moyen du poste de lecture et de l'oscilloscope ont permis de clarifier les points qui suivent.

Tout d'abord, les cinq capteurs ont continué de fonctionner, c'est-à-dire de transmettre un signal tout au long de leur cheminement au travers de la chambre de pultrusion. Bien que certaines variations de l'intensité du signal ont été remarquées sur l'oscilloscope lors des manipulations, celles-ci n'empêchaient nullement le bon fonctionnement des capteurs. Il a aussi été remarqué que lorsque le signal s'affaiblissait, il était possible de le faire augmenter ou réapparaître en tirant sur l'extrémité de la fibre optique qui n'était pas encore entrée dans la chambre de pultrusion. Cette manipulation semblait remettre le capteur bien droit selon l'axe longitudinal de l'élément de PRFV.

De manière qualitative, les déformations enregistrées par les capteurs ont évolué de la façon suivante lors de leur intégration: 1) elles ont augmenté lors de l'entrée du capteur dans la chambre de pultrusion d'un ordre de grandeur variant approximativement entre 350 à 1000 $\mu\epsilon$; 2) après avoir atteint le maxima, les déformations ont commencé à diminuer; et 3) les déformations semblaient vouloir se stabiliser à une valeur intermédiaire située entre la valeur initiale et le maxima atteint, ce qui suggérerait le développement de contraintes résiduelles. En raison de la longueur des fibres optiques, le suivi s'est arrêté entre deux à trois minutes après l'intégration. Au moment où les fibres optiques ont été débranchées, tout semblait indiquer que l'intégration avait été réussie sur les cinq capteurs.

Après l'intégration, les cinq tiges de PRFV ont été coupées et apportées en laboratoire afin de procéder aux manipulations servant à dégager les fibres optiques. Un connecteur a été posé sur chacune d'elles et les capteurs ont été interrogés. Aucun des cinq capteurs ayant pourtant traversé la chambre de pultrusion avec succès ne donnait maintenant de signal. Le moment critique se révélait donc être le refroidissement à l'air, à l'extérieur de la chambre de pultrusion

À la lumière de ces résultats, deux hypothèses ont été proposées pour tenter d'expliquer la perte du signal après le refroidissement des éléments de PRFV. La première hypothèse émise concerne le capteur. Lors du refroidissement, le phénomène de contraction radiale générerait des pressions assez importantes pour provoquer le bris du capteur. Cette possibilité a d'ailleurs été évoquée par Kalamkarov et coll. [1996]. D'après les résultats des trois premières expérimentations, cette hypothèse n'est pas retenue en raison de l'obtention, avec plusieurs capteurs différents, de signaux optiques modulés. Il n'aurait pas été possible d'obtenir de modulation si la jauge avait été brisée par le phénomène de contraction radiale.

La deuxième hypothèse, qui est celle privilégiée ici, concerne plutôt la fibre optique elle-même et fait appel au phénomène de contraction lors du refroidissement. Des microcourbures pourraient se former sur toute la longueur de la fibre optique à cause de pressions ponctuelles engendrées lors de la fabrication des barres et lors du refroidissement de celles-ci. Ces pressions ponctuelles déformeraient très localement la fibre optique, ce qui provoquerait des pertes locales de la lumière formant le signal. L'addition de toutes ces pertes locales ferait en sorte qu'à l'arrivée au poste de lecture, il n'y aurait plus assez d'intensité pour surpasser les réflexions parasites des connecteurs. Le signal se perdrait donc dans le bruit de fond des réflexions parasites.

5.3.4 Quatrième expérimentation

L'objectif de la quatrième expérimentation était principalement d'évaluer l'atténuation du signal lumineux due aux microcourbures potentiellement présentes le long de la fibre optique après la période de refroidissement. Mais aussi, en utilisant différentes gaines mécaniques pour la protection des fibres, il avait été projeté d'observer l'influence de certaines caractéristiques de ces dernières sur la performance des capteurs lors de l'intégration.

Trois fibres optiques d'une longueur approximative de 1 mètre, avec des caractéristiques différentes les unes des autres, ont été intégrées dans le même type de barres que lors de l'expérimentation précédente (troisième expérimentation). Ces trois fibres optiques ne possédaient pas de capteur car l'objectif de cette portion de l'expérimentation était de mesurer l'atténuation du signal le long de la fibre optique. Le tableau 5.8 présente les caractéristiques propres à chacune de ces fibres optiques.

TABLEAU 5.8 CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES (SANS CAPTEURS) INTÉGRÉES LORS DE LA QUATRIÈME EXPÉRIMENTATION DE L'INTÉGRATION

# fibre optique	Type de fibre	Ouverture numérique	Gaine mécanique	Diamètre (µm)	
				Cœur	Gaine
1	multimode	0.27	PVC	62,5	900
2	multimode	0.22	polyimide	50	150
3	monomode	0,12	acrylique	10	250

Il y a eu aussi, lors de la quatrième étape, des fibres optiques avec des capteurs de déformations qui ont été intégrées dans les barres en PRFV. En tout, ce sont six capteurs qui ont été testés lors de cette expérimentation.

Les fibres optiques et les capteurs ont été apportés en laboratoire après leur intégration afin de procéder aux manipulations visant à déterminer leur performance respective. Premièrement, l'évaluation de l'atténuation du signal a été réalisée à l'aide d'une comparaison entre deux fibres optiques identiques. L'une de ces fibres optiques ayant été intégrée dans le PRFV et l'autre, la fibre optique de référence ou témoin n'ayant subi aucune manipulation. La comparaison a consisté à introduire des signaux lumineux à l'intérieur des fibres optiques intégrées et à l'intérieur de leur témoin respectif et à comparer les signaux obtenus après le passage de la lumière dans ces fibres. Le paramètre mesuré était la puissance du signal (mesuré en dB) à la sortie des fibres optiques.

Les comparaisons ont respectivement donné comme résultats pour les fibres optiques # 1, 2 et 3: 99 %, 2 % et 0,4 % de la puissance du signal lumineux transmis par les fibres optiques intégrées par rapport à la puissance du signal transmis par les témoins. Ces résultats tendent à démontrer que la fibre optique # 1 a très bien résisté à son intégration dans le composite alors que les fibres # 2 et # 3 ont été fortement affectées. Les grandes différences entre les caractéristiques des trois fibres optiques utilisées et le nombre restreint d'échantillons ne permettent pas, à ce stade-ci, d'identifier le ou les paramètres ayant le plus d'influence sur la performance des capteurs à fibre optique intégrés. Néanmoins, l'hypothèse des microcourbures se trouvent renforcée par le fait que la fibre optique # 1 était la moins sujette à être affectée par ce phénomène et c'est bien elle qui a le mieux performé. En effet, la combinaison d'une fibre optique possédant un grand diamètre de cœur, une grande ouverture numérique et une gaine plus grosse et plus molle offre une meilleure protection contre l'atténuation du signal optique due aux microcourbures.

Lors de la quatrième étape, il y a eu aussi six capteurs qui ont fait l'objet d'une intégration. Les fibres optiques de trois de ces six capteurs ont été dégagées du PRFV et des connecteurs permettant le branchement au poste de lecture y ont été apposés. Les trois autres capteurs n'ont pas été extraits du PRFV. Deux de ces capteurs (# 4 et # 6) ont été irrémédiablement endommagés lors des manipulations précédant l'intégration et le troisième capteur, une fois intégré, avait sa fibre optique qui décrivait un mouvement de spirale tout au long de la barre. Il a donc été jugé qu'il ne serait pas nécessaire de le dégager du composite.

Parmi les trois capteurs qui ont été testés, un seul a donné un signal optique permettant des lectures (capteur # 3) avec le poste de lecture. Ce signal était par contre toujours d'une faible intensité et nécessitait l'utilisation de gel optique lors du branchement des connecteurs.

5.4 Intégration en industrie dans des treillis d'armature en PRFC

5.4.1 Préparation des capteurs à fibre optique SFO et intégration

Pour permettre l'intégration des jauges à fibre optique à l'intérieur des treillis Nefmac C19, il a été nécessaire de modifier l'extrémité de la fibre optique reliant habituellement la jauge à l'appareil de lecture. En effet, étant donné le procédé de fabrication des treillis, il a été tenté de réduire au maximum la dimension de l'élément intégré dans le composite. Le connecteur étant une pièce de dimension relativement grande lorsque comparé aux fibres de carbone ou à la fibre optique, c'était donc cette pièce qu'il fallait réduire. Suivant les recommandations de monsieur Claude Belleville de la compagnie Fiso Technologies inc. manufacturière des jauges à fibre optique SFO, des tubes d'acier ont été usinés à l'Université de Sherbrooke pour permettre

l'alignement de la fibre optique provenant de la jauge, avec la fibre optique transmettant les informations au poste de lecture. La figure 5.34 illustre schématiquement ce tube d'acier ainsi que la préparation réalisée pour préparer le capteur à son intégration.

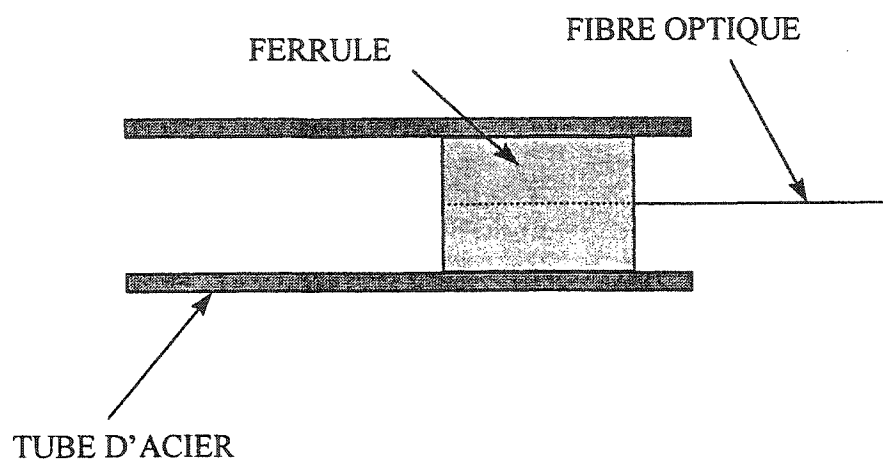


Figure 5.34 Schéma illustrant le tube d'acier usiné et la ferrule placée à l'intérieur

Comme il a été expliqué précédemment, la fabrication du treillis de PRFC Nefmac C19 consiste en la superposition de 11 couches de fibres de carbone imprégnées de résine. Donc, il a été décidé d'insérer les capteurs après la cinquième couche de fibres de carbone appliquée longitudinalement.

Lorsque cette cinquième couche a été appliquée, le procédé de fabrication a été suspendu pour permettre l'intégration. Une passerelle permettait à une personne de se positionner directement

au-dessus de la table sur laquelle était fabriquée le treillis (LS7). Le tube d'acier était d'abord déposé sur les fibres de carbone à une extrémité de la table (figure 5.35) et la fibre optique était positionnée au centre de la bande formée par les fibres de carbone. Par la suite, une légère tension était appliquée manuellement sur la fibre optique, de manière à obtenir un alignement optimal de celle-ci sur toute sa longueur de 1,8 m. De plus, un lissage du bout d'un doigt permettait de déposer la fibre optique sur les fibres de carbone et ainsi lui donner la position voulue (figure 5.36). Il est à noter qu'aucune colle ou résine époxy n'a été rajoutée pendant la fabrication. La fibre optique se retrouve entourée de fibres de carbone et de résine et elle devient solidaire du composite ainsi fabriqué. C'est de cette façon qu'elle peut transmettre les efforts internes développer dans le composite. Une mince gaine (12,5 μm) mécanique de polyimide recouvre la fibre optique sur toute sa longueur lui assurant ainsi une protection supplémentaire.

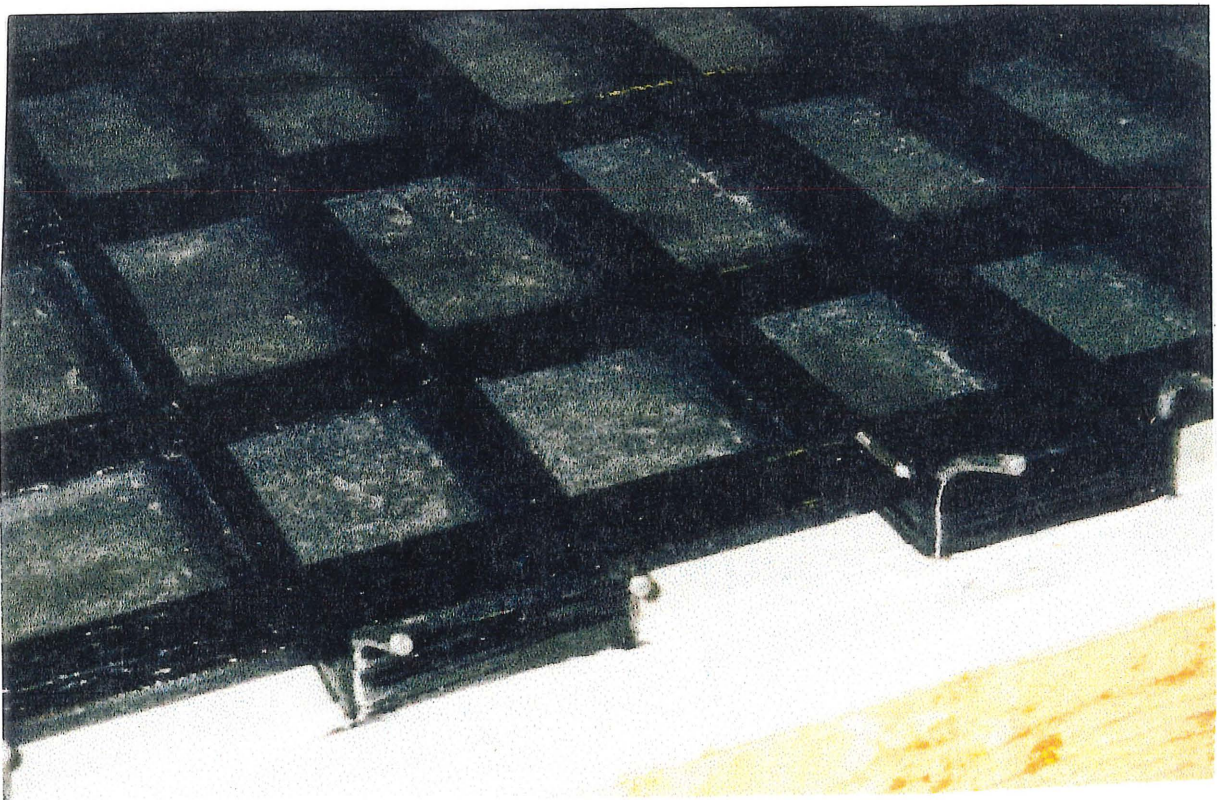


Figure 5.35 Tube d'acier et fibre optique au moment de l'intégration



Figure 5.36 Intégration d'un capteur à fibre optique dans le treillis Nefmac C19

Les trois jauges à fibre optique étant installées tel que décrit précédemment, le procédé de fabrication reprend là où il s'était arrêté, c'est-à-dire que la table subie une rotation de 90° et une couche de fibres de carbone est appliquée transversalement. Une fois le tissage ou la fabrication du treillis Nefmac C19 terminé, le treillis est placé sous l'effet d'une charge morte et son mûrissement commence. Le même procédé a été répété pour l'intégration des trois capteurs à fibre optique dans le deuxième treillis (LS8).

5.4.2 Connexion des capteurs à fibre optique en laboratoire

Après avoir subi le mûrissement adéquat, les 16 treillis ont été livrés à l'Université de Sherbrooke en vue de leur préparation pour le pont Joffre. Cette préparation consistait, pour les deux treillis possédant les capteurs à fibre optique intégrés, à dégager les tubes d'acier du composite et à vérifier si les jauges fonctionnaient toujours. Cette étape a été réalisée en

collaboration avec monsieur Claude Belleville de Fiso Technologies inc. Premièrement, il a fallu dégager les tubes d'acier du composite de manière à ce qu'environ la moitié du tube soit dénudée de résine et de fibres de carbone et que l'autre moitié demeure coincée dans le composite. À l'aide d'une scie à métaux et d'une scie électrique, les tubes ont donc été dégagés (figures 5.37). Chaque tube, préalablement à l'intégration, avait été scellé avec du silicone de manière à ce que la résine du composite ne vienne pas s'infiltrer dans le tube lors de la fabrication du composite.

Deuxièmement, il fallait faire la connexion entre la jauge et le poste de lecture avec une fibre optique possédant à une extrémité un connecteur pour le branchement au poste de lecture et, à l'autre extrémité, une ferrule qui s'introduirait dans le tube d'acier. Il est à noter que la partie fragile de ce lien se situe en dehors du tube d'acier, à la jonction entre la ferrule et la fibre optique. Malgré une enveloppe protectrice en métal (petit cylindre d'acier collé sur la ferrule et rempli d'époxy) et une gaine protégeant la fibre optique sur le reste de sa longueur, à plusieurs reprises, il y a eu bris de la fibre optique lorsqu'il était tenté de l'insérer dans le tube d'acier.

Finalement, après plusieurs essais, les six jauges ont été connectées et elles ont toutes renvoyées des signaux satisfaisants sur l'oscilloscope et sur le poste de lecture. Donc l'intégration de jauges à fibre optique dans les treillis de type Nefmac s'est avérée concluante malgré la fragilité de la connexion. Les figures 5.38 et 5.39 montrent les capteurs à fibre optique intégrés dans le treillis Nefmac une fois les manipulations terminées.

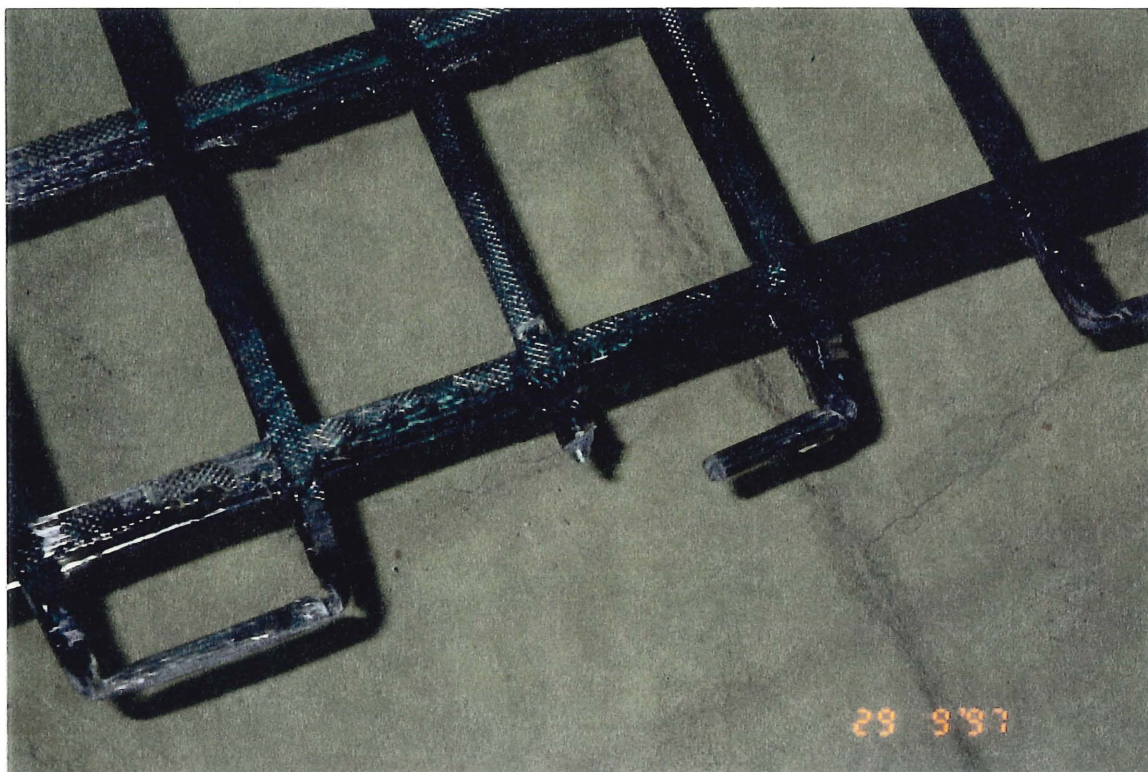


Figure 5.37 Tubes d'acier dégagés du PRFC

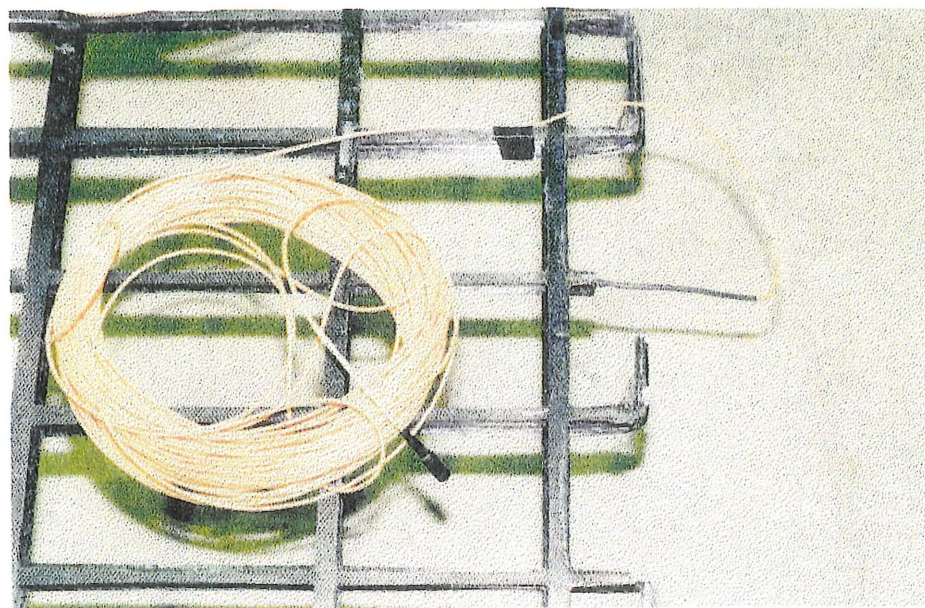


Figure 5.38 Vue rapprochée d'un capteur à fibre optique intégré dans le treillis Nefmac



Figure 5.39 Capteurs à fibre optique intégrés et opérationnels

5.5 Pont Joffre

Les premiers résultats obtenus, en ce qui concerne l'instrumentation du pont Joffre, sont présentés dans cette section. L'installation et la mise en fonction des différents instruments de mesure utilisés dans ce projet ont été réalisées sur une période de plusieurs semaines. Donc, plusieurs lectures ont été prises à des dates différentes. Par exemple, les lectures initiales sur les capteurs à fibre optique de type SFO collés sur les treillis Nefmac et les lectures initiales des jauges électriques collées sur ces mêmes treillis ne correspondent pas à la même date. Pour cette raison et aussi étant donné le nombre important de jauges en opération, les résultats seront présentés en respectant deux critères : le type de jauge et la position de celle-ci.

5.5.1 Capteurs à fibre optique SFO collés sur les treillis Nefmac C19

Un total de vingt-six capteurs à fibre optique de type SFO ont été collés sur les treillis Nefmac LS5, LS6, LS9 et LS10. Tous ces capteurs ont été vérifiés au laboratoire, après collage, pour s'assurer de leur bon fonctionnement et tous ont passé cette étape avec succès. La série de lectures suivantes a été prise après l'installation de l'armature en chantier mais avant le bétonnage. À ce moment, les vingt-six capteurs fonctionnaient toujours. D'autres lectures ont été prises un jour après le bétonnage, et à ce moment, trois capteurs ne renvoyaient plus de signaux. Donc l'étape de bétonnage a directement occasionné le bris ou la mise hors d'usage de trois capteurs à fibre optique sur un total de vingt-six (11,5%). Aucun autre capteur SFO n'a été perdu pendant les étapes d'application de la post-tension, de décoffrage, de pose du revêtement bitumineux et d'ouverture à la circulation. Lors du dernier relevé (22/05/98) après vingt-quatre semaines en service, cette situation prévalait toujours. La figure 5.40 présente le suivi des capteurs SFO collés sur le treillis LS5 depuis l'installation des treillis sur le pont Joffre jusqu'à la 24^e semaine. Les résultats des treillis LS6, LS9 et LS10 sont présentés à l'annexe B. Il est à noter que la valeur initiale ou zéro, correspond à la lecture prise le 23/10/97 alors que les treillis étaient installés en chantier, avant le bétonnage du tablier (24/10/97). Les variations observées sur le graphique sont relatives à cette valeur initiale. Pour expliquer cette procédure, prenons le cas de la jauge FO-LS5-4A :

Lecture initiale L_0 (23/10/97) : 8053 $\mu\epsilon$

Lecture suivante L_1 (24/10/97) : 7957 $\mu\epsilon$

$$\text{Variation observée } \Delta L = L_1 - L_0 = 8053 - 7957 = -96 \mu\epsilon \quad [5.1]$$

Le deuxième point du graphique de la figure 5.40 se retrouve à -96 $\mu\epsilon$ par rapport à la valeur initiale selon le calcul présenté ci-haut.

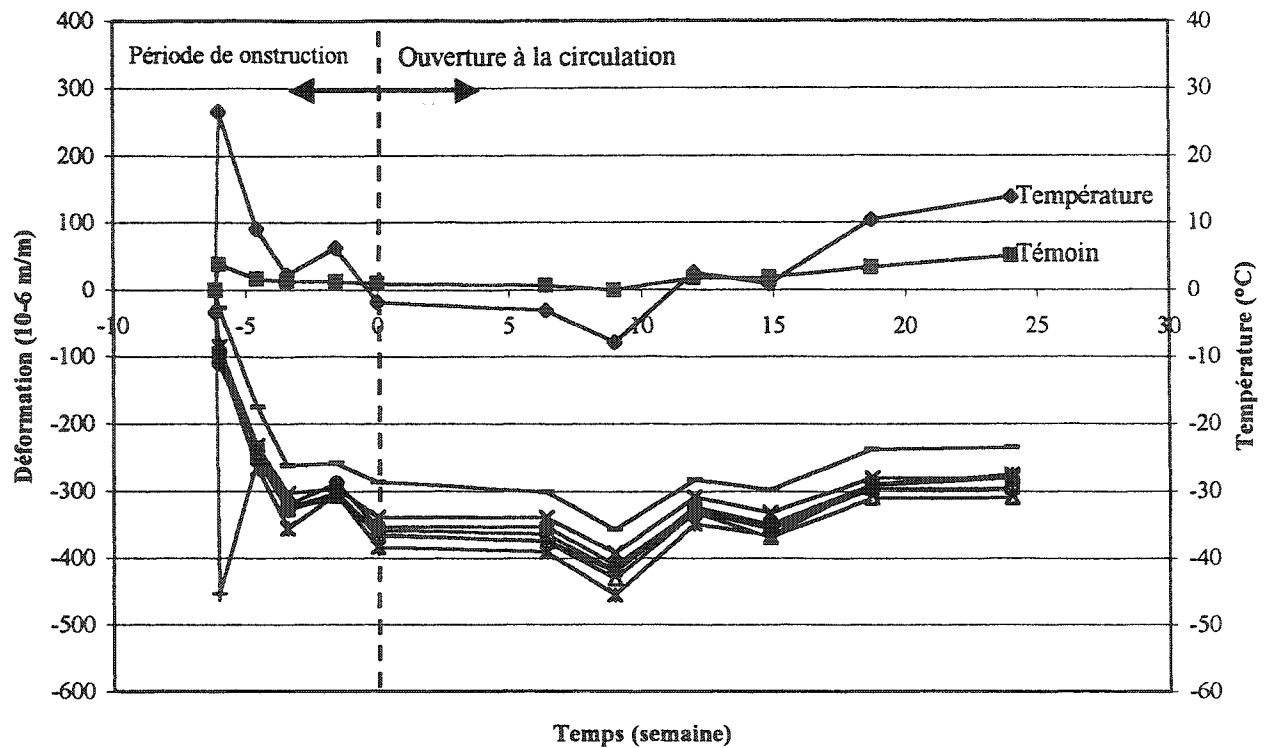


Figure 5.40 Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS5

La même procédure de calcul est suivie pour tous les autres points subséquents ainsi que pour les autres jauges ou capteurs à l'exception des capteurs à corde vibrante. Ces derniers nécessitent l'utilisation d'une formule de conversion pour obtenir les déformations en $\mu\epsilon$. Il apparaît aussi sur la figure 5.40 une courbe intitulée témoin. Cette courbe correspond à un capteur à fibre optique SFO ayant été collé sur un échantillon du treillis Nefmac C19 qui lui, a été fixé à l'intérieur d'un tube de plastique. Ce tube était fermé à chaque bout de sorte qu'il n'y ait pas de béton qui pénètre à l'intérieur. Ce tube a été enfouis dans le tablier de béton, près des autres capteurs, de manière à fournir des lectures n'étant influencées que par la variation de température. La courbe de température apparaissant aussi sur cette figure indique la variation de température à l'intérieur du béton. Les valeurs proviennent d'une jauge de température à fibre optique de type TFO-H placée près des treillis Nefmac.

5.5.2 Capteurs à fibre optique SFO intégrés dans les treillis Nefmac C19

Comme il a été expliqué précédemment, trois capteurs à fibre optique de type SFO ont été intégrés dans chacun des treillis Nefmac LS7 et LS8. Après diverses manipulations, les six capteurs ont été rendus fonctionnels et ont été interrogés en laboratoire. La pose de l'armature en chantier a causé la perte d'un de ces capteurs, le câble contenant la fibre optique ayant été sectionné. Les premières lectures ont été prises avant le bétonnage. À ce moment, il n'y avait plus que quatre capteurs qui renvoyaient un signal permettant de prendre des lectures. La cause de la perte du deuxième capteur demeure donc inexpliquée. D'autres lectures ont été prises une journée après le bétonnage et alors, il ne restait plus que deux capteurs fonctionnels. Les étapes de bétonnage et de mise en place du béton ont donc occasionné la mise hors d'usage de deux autres capteurs. En date du 22/05/98, ces deux capteurs fonctionnaient toujours. La figure 5.41 présente leur suivi.

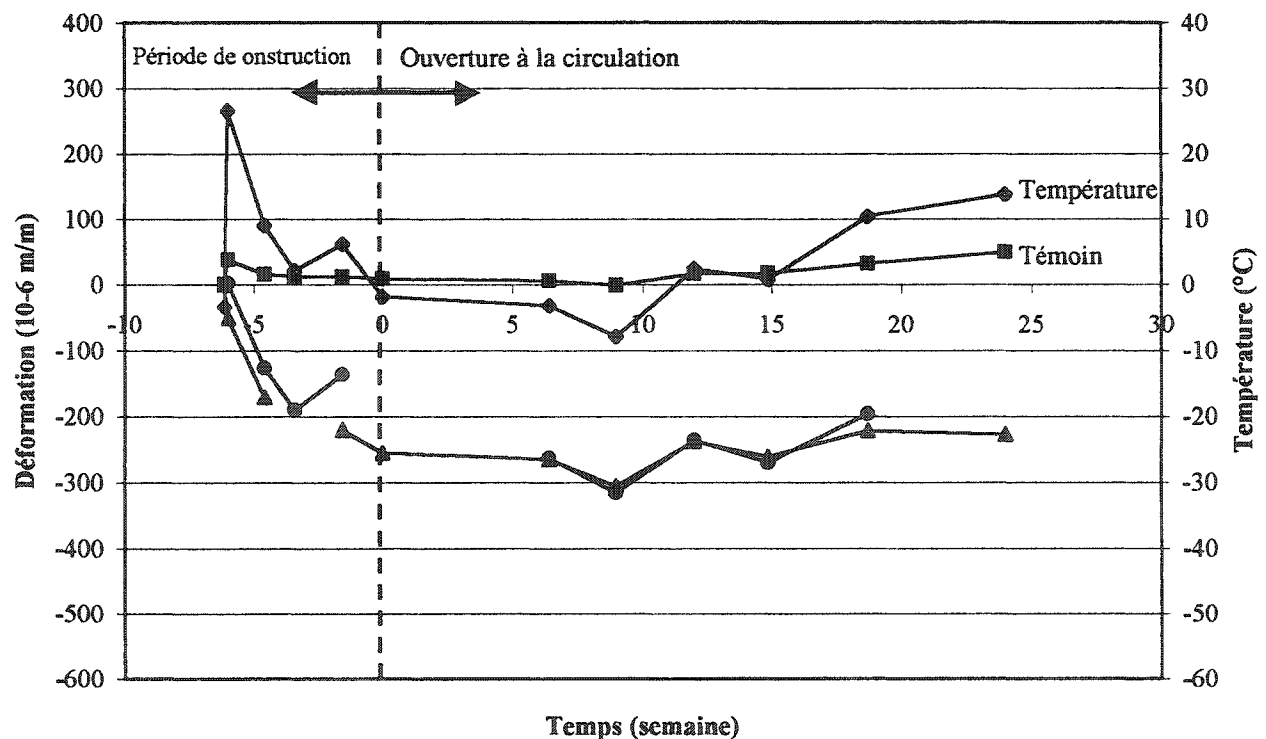


Figure 5.41 Capteurs à fibre optique intégrés dans les treillis Nefmac LS7 et LS8

Les courbes du suivi de ces deux capteurs sont discontinues. À plusieurs reprises, lors de la prise de lecture sur le terrain, les capteurs semblaient ne plus renvoyer de signaux assez puissants pour que le poste de lecture puisse en faire l'interprétation. Même en branchant le connecteur sur un autre canal, aucune lecture ne pouvait être prise. Mais lors d'une visite ultérieure, le capteur recommençait à donner des lectures. Les signaux de ces deux capteurs étant très faibles, il est probable que la moindre poussière ou saleté présente sur les connecteurs empêchent de prendre des lectures.

5.5.3 Jauges électriques collées sur les treillis Nefmac C19

La cueillette de données des jauges électriques s'étant effectuée moins systématiquement que celles des capteurs à fibre optique, quelques données demeurent manquantes. Les valeurs initiales ou zéros des jauges électriques collées sur les treillis Nefmac ont été prises le 30/10/97, c'est-à-dire après le bétonnage. La comparaison entre les jauges électriques et les capteurs à fibre optique ne peut donc pas être réalisée directement. Néanmoins, la figure 5.42 présente les données recueillies des jauges électriques du treillis LS6.

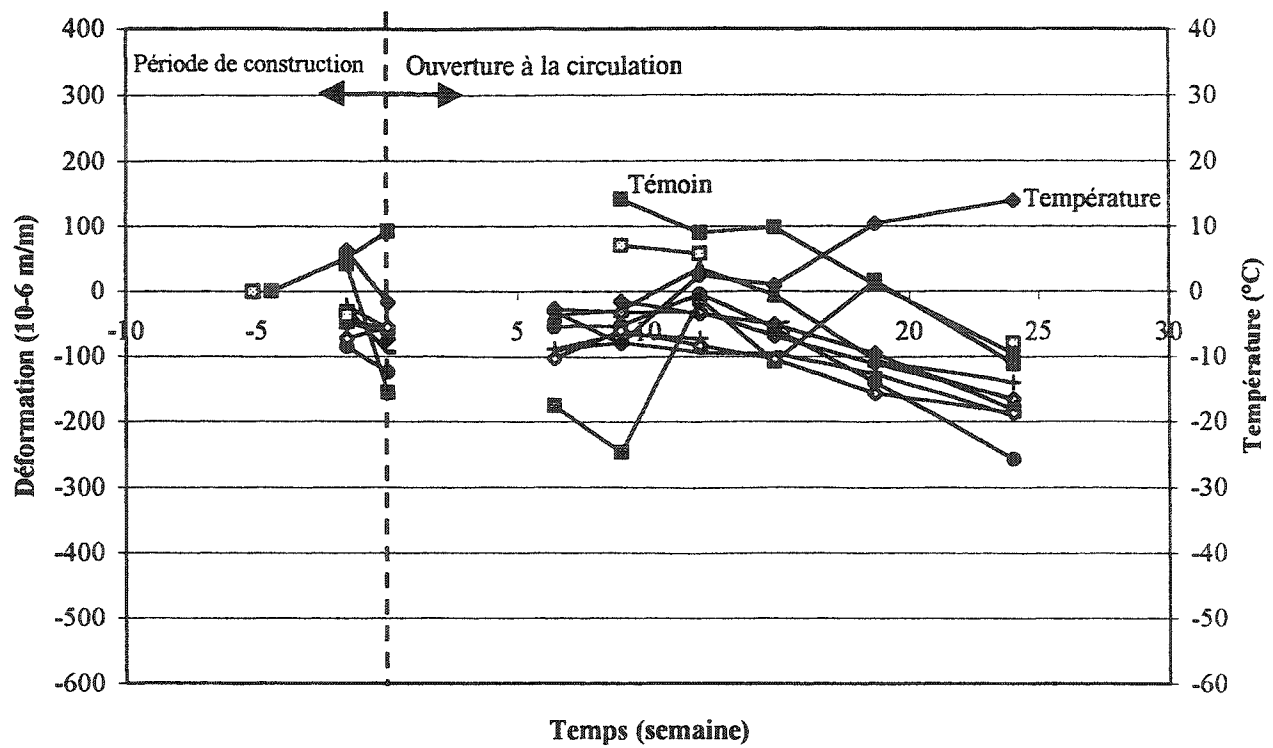


Figure 5.42 Jauges électriques collées sur le treillis Nefmac LS6

5.5.4 Capteurs à fibre optique SFO-W soudés sur la poutre d'acier centrale

Trois capteurs à fibre optique de type SFO-W ont été soudés sur l'âme de la poutre centrale en acier tel que schématisé sur la figure B.4. Leur installation a été réalisée en date du 30/10/97, mais les connecteurs n'ont pu être amenés à la boîte de jonction que le 19/01/98. La première lecture a donc été prise à l'installation des capteurs mais la lecture suivante n'a pu être prise que le 06/02/98 soit neuf (9) semaines après la mise en service de l'ouvrage. Cette particularité peut être remarquée sur la figure 5.43 par des points d'ordonnée nulle à environ -5 semaines, tandis que le reste de la courbe reprend à 9 semaines après l'ouverture du pont à la circulation. La figure 5.43 est complétée par une courbe de température. Les valeurs des points de cette courbe proviennent de la moyenne des trois lectures de température prises avec les capteurs à corde vibrante (SM2-W) soudés sur la même poutre.

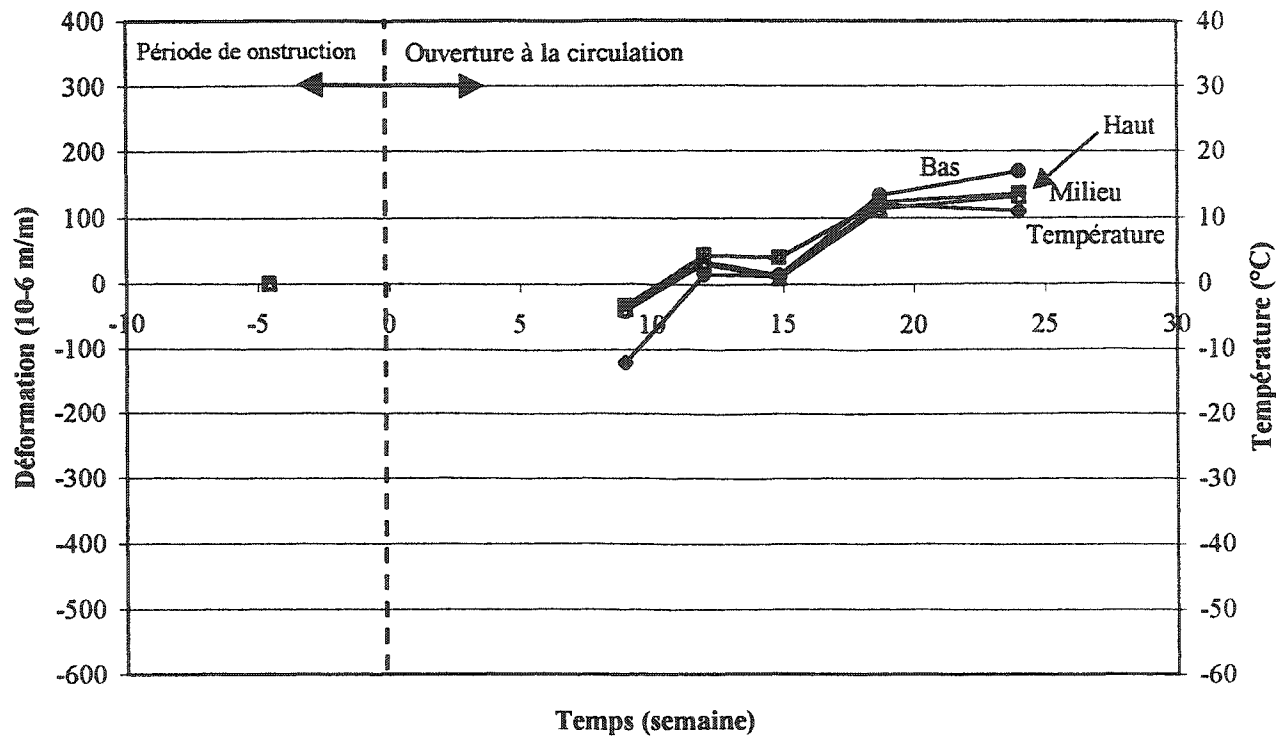


Figure 5.43 Capteurs à fibre optique soudés sur la poutre d'acier centrale

5.5.5 Jauges électriques soudées sur les poutres d'acier du pont Joffre

Comme il peut être observé sur la figure B.4, trois jauges électriques ont été soudées sur l'âme de chacune des cinq poutres d'acier. Cette étape d'installation ne s'est, par contre, pas fait en même temps pour les jauges des cinq poutres. Les lectures initiales de ces jauges ont été prises respectivement pour les poutres A, B, C, D et E les 14/10/97, 09/10/97, 14/10/97, 31/10/97 et 09/12/97 quelques heures après leur installation. Ce laps de temps est nécessaire pour permettre aux soudures de refroidir et à l'acier de reprendre sa déformation normale. Suite à ces lectures initiales, les jauges électriques ont été lues de manière sporadique jusqu'au 06/02/98, date à laquelle le suivi régulier a débuté. Cette date du 06/02/98 correspond à la neuvième semaine sur la figure 5.44 qui présente les lectures provenant de la poutre C, soit la poutre centrale. Les résultats provenant des autres poutres sont présentés à l'annexe B.

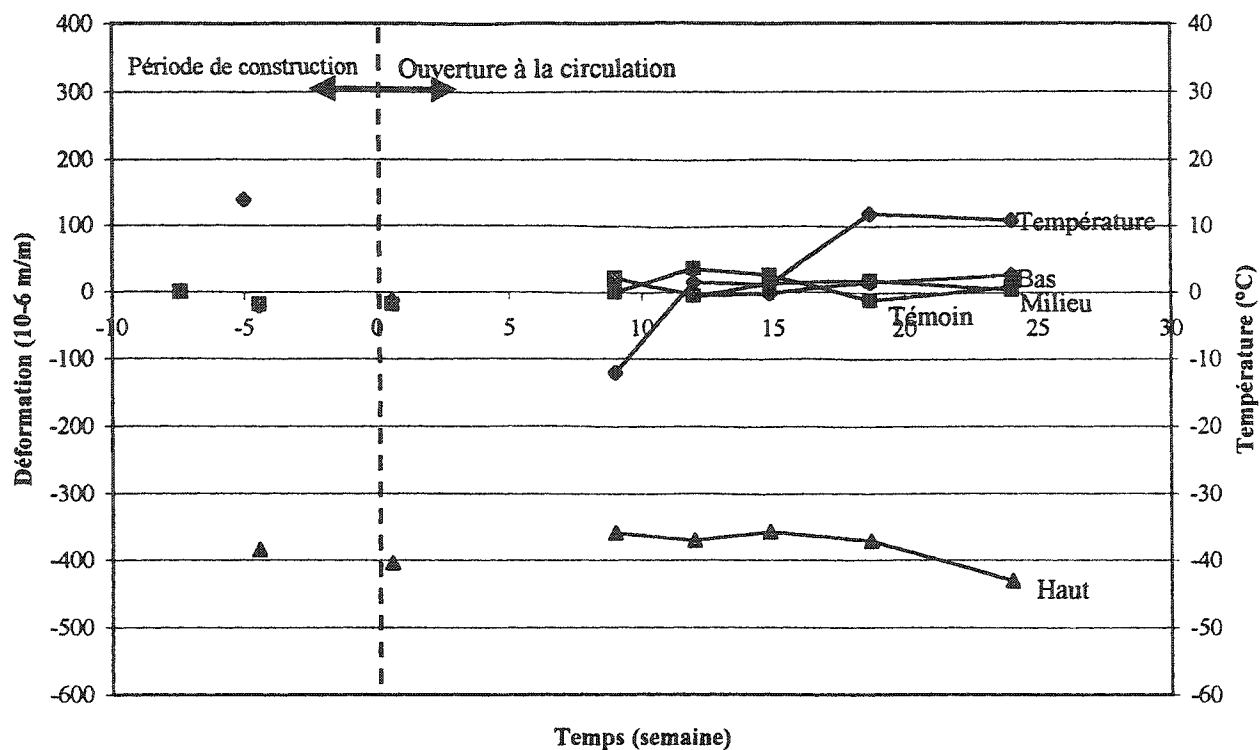


Figure 5.44 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier centrale (C)

Une jauge électrique témoin a été utilisée pour déterminer l'influence de la température. Elle a été soudée (et protégée comme les autres jauges électriques) sur une pièce du métal ayant servi à la fabrication des poutres. Cette pièce de métal est placée sous le pont, près des poutres métalliques. La figure 5.44 présente, elle aussi, une courbe étiquetée température. Cette courbe est la même courbe qu'on retrouve sur le graphique des capteurs à fibre optique SFO-W (figure 5.43). Elle provient donc de la moyenne des températures enregistrées par les capteurs à corde vibrante SM2-W.

5.5.6 Capteurs à corde vibrante SM-2W soudés sur la poutre centrale d'acier

Les trois capteurs à corde vibrante de type SM-2W ont été installés en même temps que les capteurs à fibre optique SFO-W soit le 30/10/97. Contrairement à ces derniers, les capteurs à corde vibrante ont été lus régulièrement pendant les premières semaines de sorte que le graphique de la figure 5.45 montre des valeurs sur toute la période de lecture possible. Bien que chacun des trois capteurs renvoie sa propre lecture de température, la moyenne a été utilisée pour tracer la courbe de température du graphique. Les différences entre les trois jauges étant de l'ordre du dixième de degré Celcius, elles n'auraient pas été perçues sur le graphique.

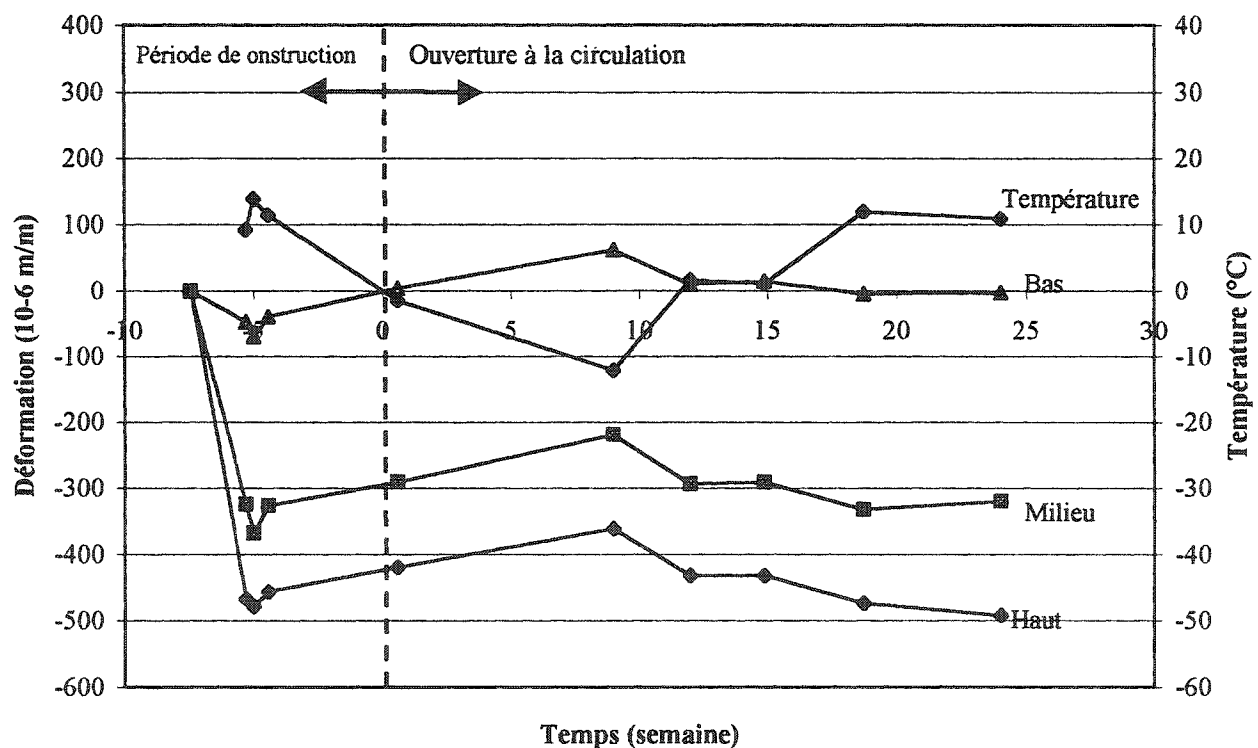


Figure 5.45 Capteurs à corde vibrante soudés sur la poutre centrale d'acier

Les lectures prises avec le poste de lecture des capteurs à corde vibrante le sont en micro-secondes (μs). Il faut utiliser la relation suivante pour faire la transformation des μs aux $\mu \epsilon$:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_0 = K * 10^9 * [1/(N_1)^2 - 1/(N_0)^2] \quad [5.2]$$

où $\Delta \epsilon$: variation de déformation en $\mu \epsilon$
 K : constante de jauge = 0,3911 (longueur = 50.8 mm)
 N_0 : lecture initiale (μs)
 N_1 : lecture finale (μs)

5.5.7 Capteurs à fibre optique enfouis dans le béton du tablier

Deux types de capteur à fibre optique ont été enfouis dans le tablier de béton du pont Joffre. Premièrement, il y a deux capteurs TFO-H qui fournissent la température à l'intérieur de la dalle de béton au niveau des armatures en PRFC et, deuxièmement, il y a deux capteurs EFO qui mesurent la déformation dans le béton. La figure 5.46 présente le suivi des deux capteurs de température TFO-H. Le graphique de la figure 5.46 a été tracé à la même échelle que les graphiques précédents de manière à permettre une certaine comparaison. L'identification des capteurs n'apparaît pas sur ce graphique étant donné la grande similitude observée entre les deux courbes. Cette identification n'apporterait aucun élément nouveau et a donc été abandonnée. Le suivi des capteurs EFO est quant à lui présenté à la figure 5.47. Sur cette figure, la courbe de la température provient d'un capteur à fibre optique TFO-H. C'est donc le profil de la température à l'intérieur du béton du tablier qui est ainsi montré.

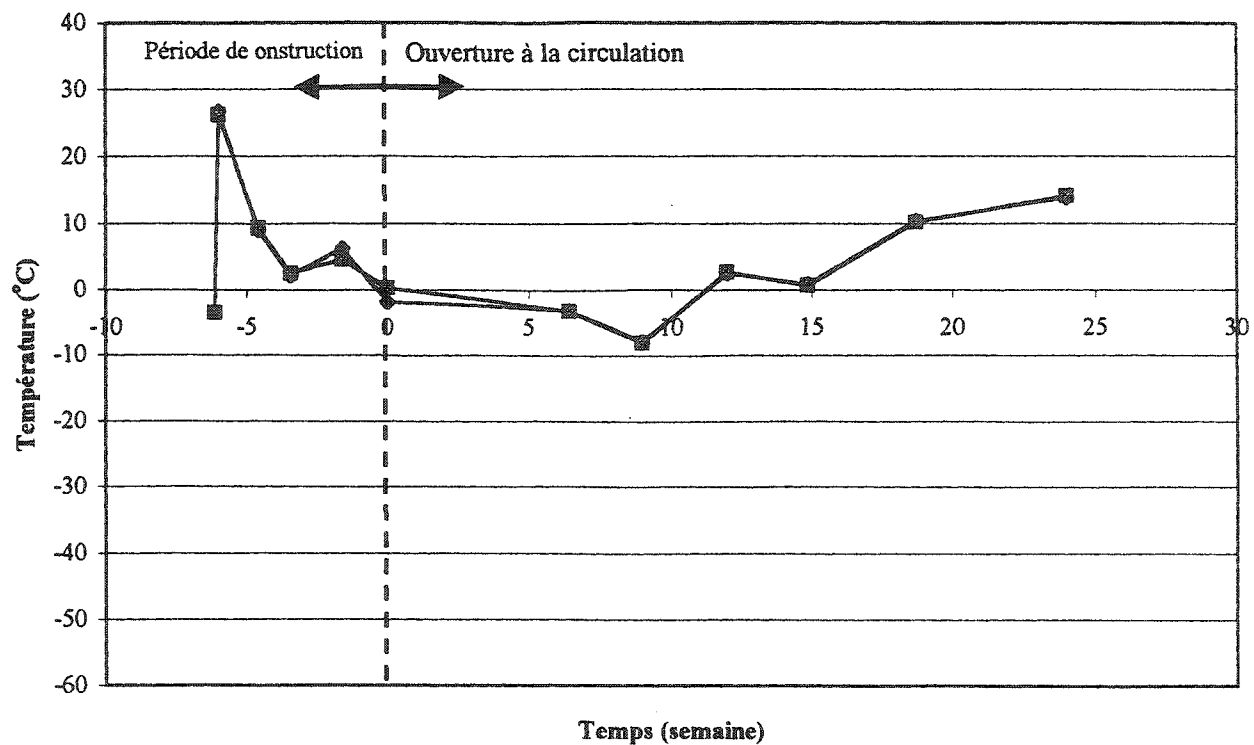


Figure 5.46 Capteurs à fibre optique TFO-H enfouis dans le tablier de béton

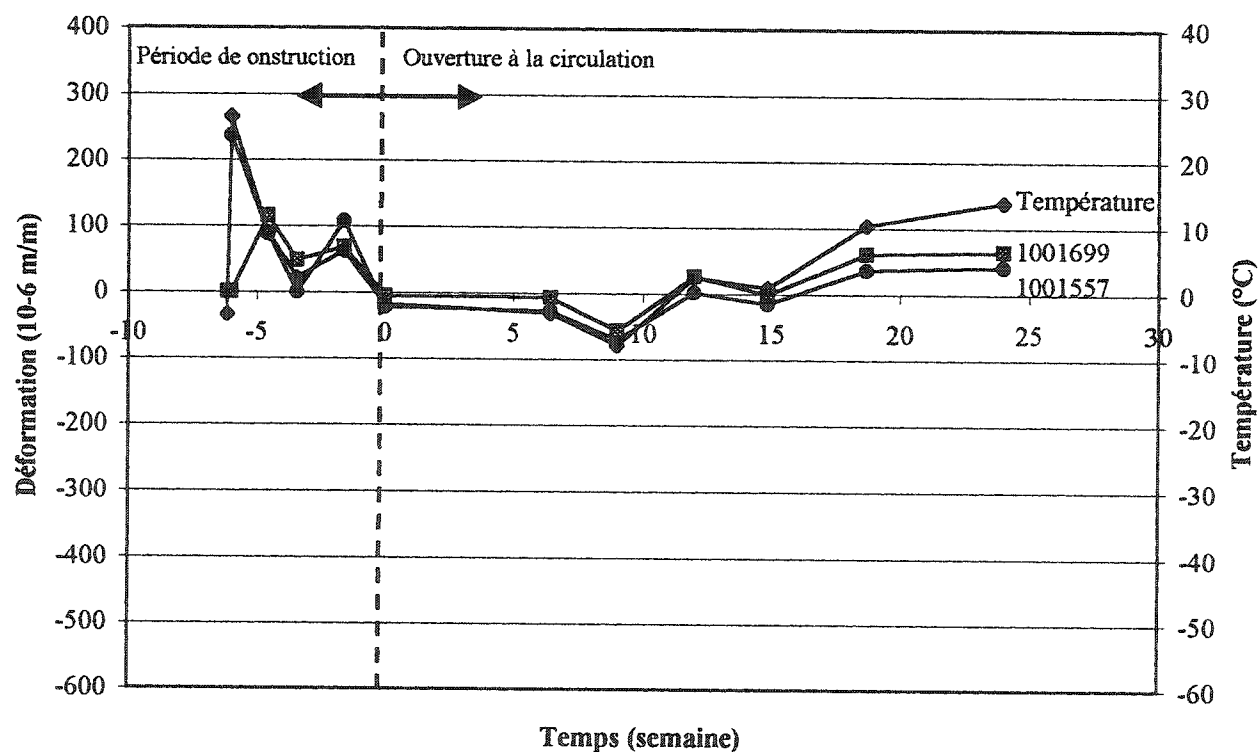


Figure 5.47 Capteurs à fibre optique EFO enfouis dans le tablier de béton

5.5.8 Blocs de jauges électriques enfouis dans le béton du tablier

Un total de trente-six jauges électriques de type EGP-5-120 ont été installées dans le tablier du pont au-dessus des poutres principales (cinq blocs de quatre jauges) et entre chacune d'elles (quatre blocs de quatre jauges) comme il est illustré sur la figure B.4. Chacune des quatre jauges d'un bloc rend compte des déformations du béton à une profondeur différente. Ces jauges sont montées sur un petit support en acier qui permet de les positionner de manière précise. La figure B.5 montre un bloc de quatre jauges avant qu'il soit coulé dans le béton et la figure B.6 montre un schéma des positions des jauges sur le support. Les neuf blocs de jauges ont été installés en même temps et les lectures initiales ont été prises à la même date exceptées celles concernant le bloc E qui ont été prises ultérieurement. La figure 5.48 présente le suivi du bloc de jauges C. La courbe de température apparaissant sur cette figure provient d'un capteur à fibre optique TFO-H enfouis dans le béton du tablier.

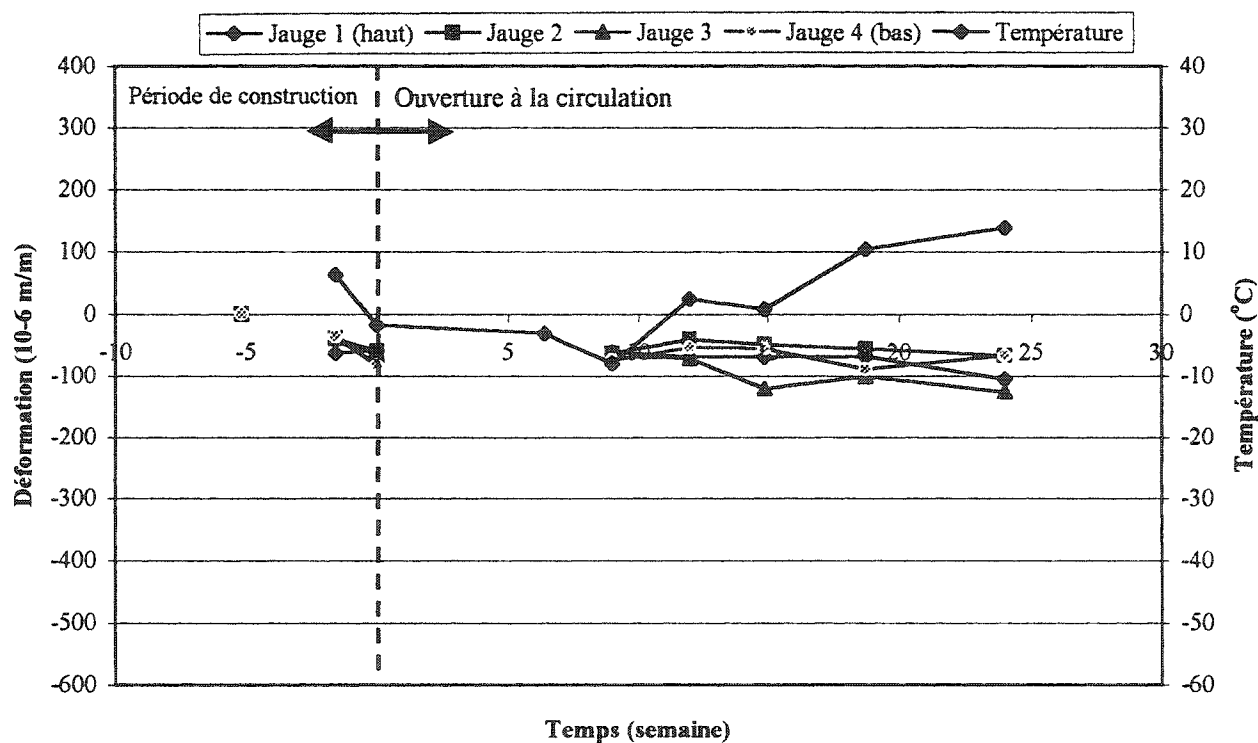


Figure 5.48 Jauges électriques du bloc C

5.5.9 Capteurs à corde vibrante EM-5 enfouis dans le béton du tablier

Des capteurs à corde vibrante de type EM-5, au nombre de six, ont aussi été enfouis dans le béton du tablier. Ces capteurs fournissent les déformations mais ils donnent aussi la température du béton dans lequel ils sont enfouis. La même procédure de transformation des lectures qui a été utilisée pour les capteurs SM-2W doit être appliquée aux capteurs EM-5 sauf que la constante de jauge n'est pas semblable. Pour passer des lectures prises en μs à des valeurs en $\mu \epsilon$, il faut appliquer la formule suivante:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_0 = K * 10^{-9} * [1/(N_1)^2 - 1/(N_0)^2] \quad [5.3]$$

où

$\Delta \epsilon$:	variation de déformation en $\mu \epsilon$
K:	constante de jauge = 4,062 (longueur de jauge = 127 mm)
N_0 :	lecture initiale (μs)
N_1 :	lecture finale (μs)

Il est à remarquer que la perte d'un des capteurs EM-5 a été constatée lors de la première prise de lecture, le poste ne renvoyant pas de signal pour ce capteur. Il ne peut être déterminé exactement à quel moment est survenu la perte et quelle est la cause exacte du bris de ce capteur. La figure 5.49 présente donc le suivi des cinq autres capteurs ainsi que le profil des températures moyennes donné par ces cinq capteurs.

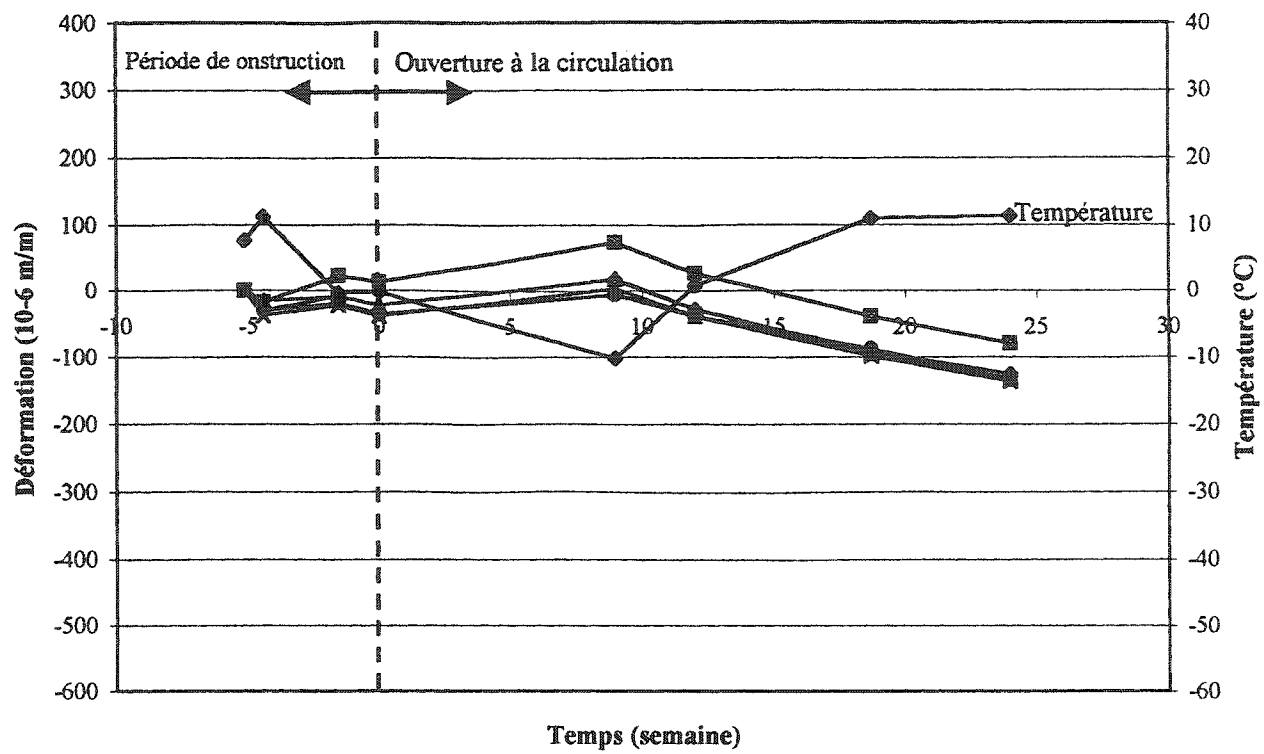


Figure 5.49 Capteurs à corde vibrante EM-5 enfouis dans le tablier de béton

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche a été consacré principalement à l'étude des capteurs à fibre optique de type SFO dans le but de les utiliser pour l'instrumentation de structures de génie civil.

Le programme expérimental a été divisé en trois volets distincts. Le premier volet a regroupé les essais de laboratoire qui ont touché les aspects thermique, mécanique et cyclique. Le deuxième volet a, pour sa part, été réalisé en industrie et a exploré l'intégration des capteurs à fibre optique dans les polymères renforcés de fibres (PRF). Le troisième et dernier volet a consisté en une application pratique réalisée en chantier, soit l'instrumentation d'un pont autoroutier avec armature en PRF.

Suite à la réalisation de ce programme expérimental, les *conclusions* suivantes peuvent être énoncées pour chacun des trois volets.

Premier volet: essais de laboratoire

- 1) Une méthode pour la préparation et le collage des capteurs à fibre optique est suggérée suite à l'expérimentation de trois méthodes différentes.
- 2) Les essais thermiques ont démontré que les capteurs SFO peuvent fonctionner dans une plage de températures variant de -20°C à $+65^{\circ}\text{C}$. Plusieurs mise hors d'usage sont par contre survenues lors des essais thermiques lorsque les capteurs avaient été collés sur divers

matériaux. Ce problème a été observé à basses températures [0°C ; -20°C] tout comme à hautes températures [25°C ; 65°C]. Il a aussi été remarqué que les résultats obtenus à basses températures sont plus dispersés que ceux obtenus à hautes températures. Les causes de ces comportements n'ont pu être identifiées en raison du faible nombre d'échantillons.

- 3) Le suivi du mûrissement de la dalle de béton avec armature en PRFC a permis de démontrer que la cure du béton peut être suivie au moyen de capteurs SFO et EFO. Une différence de comportement a par contre été notée entre ces deux types de capteurs. Le profil de déformations des capteurs EFO a montré une grande similarité avec le profil des températures. Les capteurs SFO, quant à eux, ont présenté un comportement qui semble avoir été influencé par la température pendant les premières heures et par le béton et l'armature de PRFC par la suite.
- 4) Les essais mécaniques ont démontré que le capteur SFO était compatible avec plusieurs types de matériaux tels l'acier, les PRFV, les PRFC et le béton. Les graphiques contraintes/déformations ont démontré que le capteur SFO présentait un comportement linéaire et similaire aux autres instruments de mesure utilisés jusqu'à une déformation de $917\ \mu\epsilon$. Pour des déformations supérieures à $917\ \mu\epsilon$, un phénomène qui a été nommé saut de déformations a été observé sur tous les échantillons testés en traction. L'intervalle des déformations pour lequel ce phénomène a été observé est de $917\ \mu\epsilon$ à $3889\ \mu\epsilon$.

- 5) Trois chargements statiques de la dalle avec armature de PRFC ont été suivis avec les capteurs à fibre optique SFO et EFO. Les capteurs ont présentés des comportements réguliers pendant ces trois chargements.
- 6) Les capteurs à fibre optique SFO et EFO ont résisté à plus de quatre millions de cycles de chargement imposés à la dalle de béton avec armature en PRFC. Les essais comparatifs réalisés avec le poste de lecture de référence ont démontré que les capteurs SFO fonctionnaient toujours normalement après les chargements cycliques et que c'était le poste de lecture qui avait besoin d'un nettoyage et d'une vérification. En ce qui a trait aux capteurs EFO, les essais comparatifs n'ont pas permis d'identifier la cause du comportement inattendu (non-sinusoïdal) car les déformations recueillies avec les deux postes de lecture étaient similaires.

Deuxième volet: Intégration de capteurs SFO en industrie

- 7) L'intégration de capteurs à fibre optique dans des barres d'armature en PRF au moyen du procédé industriel de pultrusion n'est pas simple.
- 8) Certaines modifications à l'équipement servant au procédé industriel de pultrusion seraient requises afin d'assurer la fabrication d'éléments intégrés avec un taux de succès élevé.
- 9) Les capteurs résistent aux contraintes thermiques et aux contraintes de pressions présentes dans la chambre de pultrusion. La portion critique de l'intégration, lorsque le capteur a

franchi l'entrée de la chambre de pultrusion, se situe lors du refroidissement de l'élément fabriqué.

- 10) L'hypothèse retenue pour expliquer l'atténuation du signal optique est l'induction de microcourbures le long de la fibre optique. Cette hypothèse expliquerait la faible intensité du signal ainsi que la présence d'un signal optique modulé. Les caractéristiques de la fibre optique ayant donnée les meilleurs résultats de transmission après son intégration sont: un grand diamètre du cœur de la fibre optique, une grande ouverture numérique et une gaine mécanique épaisse et relativement molle. Ces caractéristiques favorisent la protection de la fibre optique contre les microcourbures.
- 11) L'intégration de capteurs à fibre optique SFO dans un treillis Nefmac est possible et a été réussie. Six capteurs SFO intégrés ont été rendus fonctionnels après manipulations en laboratoire. Par contre, ces manipulations se sont avérées laborieuses et ont dû être reprises plusieurs fois pour obtenir des capteurs fonctionnels.

Troisième volet: Instrumentation du pont Joffre à Sherbrooke

- 12) Les capteurs à fibre optique (SFO, SFO-W, EFO et TFO-H) ont permis l'instrumentation d'une structure réelle soit le pont Joffre à Sherbrooke. La majorité des capteurs, soit 32 capteurs sur un total de 39 (82%), ont survécu à l'étape de la construction et ont permis de faire un suivi sur une période d'environ six mois.

- 13) Le transfert du laboratoire au chantier des capteurs à fibre optique SFO intégrés dans les treillis Nefmac s'est avéré difficile. Quatre des six capteurs intégrés ont été rendus inopérants lors des étapes de pose et de bétonnage. Ce n'est pas le capteur lui-même ou la fibre optique intégrée dans le composite qui sont à l'origine des difficultés rencontrées, mais bien la connexion au point de sortie du treillis. Le système employé s'est avéré inadéquat.
- 14) Le suivi des capteurs à fibre optique montre qu'il existe une grande similarité entre leur profil de déformation et celui de la température. Ce comportement n'est pas observé avec les autres types de capteurs. Les capteurs à corde vibrante, au contraire, évoluent d'une façon complètement inverse. Ceci démontre par contre qu'ils sont eux aussi dépendants de la température. En ce qui a trait aux jauges électriques, l'analyse du profil est beaucoup moins révélateur.

Les conclusions de cette étude permettent de formuler certaines *recommandations* pour la poursuite du développement et de l'utilisation des capteurs à fibre optique SFO.

- 1) Effectuer d'autres essais afin de valider le comportement du capteur SFO sous contraintes thermiques. Il serait alors important de porter une attention particulière à la résine époxy utilisée ainsi qu'aux équipements chauffant et réfrigérant afin de s'assurer qu'ils n'influencent pas les résultats de l'expérimentation.

- 2) Réaliser d'autres essais sur la plage de déformation pour laquelle le phénomène de saut de déformations a été observé. Faire ces essais avec un oscilloscope branché en parallèle pour suivre l'évolution du signal optique lorsque le saut de déformations se produit.
- 3) Effectuer la comparaison entre tous les instruments de mesure utilisés lors de l'essai de chargements cycliques de la dalle de béton avec armature de PRFC afin de valider les résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique SFO et EFO.
- 4) Apporter des modifications à la ligne de production des barres d'armature en PRF au moyen du procédé de pultrusion. En particulier, il serait nécessaire de mettre en place un système de guidage à l'entrée de la chambre de pultrusion pour acheminer les capteurs jusqu'à l'intérieur de celle-ci et de les positionner au centre de la section de l'élément fabriqué. Ce système devrait en même temps permettre de diminuer la turbulence présente à l'entrée de la chambre de pultrusion.
- 5) Développer une protection adéquate des fibres optiques lors de leur intégration soit par l'agencement de gaines mécaniques utilisées actuellement dans d'autres domaines ou par le développement de nouvelles gaines. Ces gaines devront protéger la fibre optique tout en assurant l'intégrité structurale de l'élément fabriqué.
- 6) Apporter des modifications au système utilisé pour la sortie des câbles à fibre optique dans les PRF pour éviter de créer un point de faiblesse, car lorsqu'un bris se produit à cet endroit, il est difficile de procéder à une réparation.

- 7) Continuer le suivi des capteurs du pont Joffre afin d'observer l'évolution du comportement de ces capteurs dans le temps.
- 8) Réaliser des essais de chargements statiques et dynamiques à intervalles réguliers sur le pont Joffre afin de comparer les résultats obtenus des différents instruments de mesure entre eux.

BIBLIOGRAPHIE

- ANSARI, F. et LIBO, Y. (1998) *Mechanics of bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors*, ASCE, J. Eng. Mechanics, 124 (4).
- ANSARI, F. (1997) *State-of-the-art in the Applications of Fiber-optic Sensors to Cementitious Composites*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 3-19.
- ANSARI, F. et NAVALURKAR, R. K. (1993) *Kinematics of Crack Formation. Cementitious Composites by Fiber Optics*, ASCE-EMD Spec. Publ., Vol. 119. ASCE, New-York, p. 1048-1058.
- ANSARI, F. (1990) *A New Method for Assessment of Air Voids in Plastic Concrete*, Cement Concrete Res., 30. p. 901-910.
- BARBACHI, M. (1995) *Comportement de capteurs à fibre optique noyés dans un matériau diversement sollicité - Applications en génie civil*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, 166 p.
- BENMOKRANE, B. et CHAALLAL, O. (1994) *Étude sur les propriétés des tiges d'armature composites à base de fibres "Isorod" et essais sur poutres en béton armé*, Rapport technique ISO-3-94, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 116 p.
- CARMEN, G. P. et SENDECKYI, G. P. (1993) *Review of the Mechanics of Fiber Optic Sensors*, J. Compos. Technol. Res., 17 (3), p. 183-193.
- CHAALLAL, O. et BENMOKRANE, B. (1993a) *Physical and Mechanical Performance of an Innovative Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod for Concrete and Grouted Anchorages*, Canadian Journal of Civil Engineering, 20, No 2, p. 254-268.
- CHAALLAL, O. et BENMOKRANE, B. (1993b) *Pullout and Bond of Glass Fiber Rods Embedded in Concrete and Cement Grout*, RILEM Materials And Structures Journal, 26, No 157, p. 167-175.
- CHEN, Z., MENDEZ, A., LI, Q. et ANSARI, F. (1998) *Fiber Optic White Light Distributed Sensor for Condition Monitoring of Civil Structures*, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, 1998, p. 101 à 114.
- DAVIES, C.M., CAROME, E. F., WEIK, M.H., EZEKIEL, S. et EINZIG, R.E. (1986) *Fiber Optic Sensor Technology Handbook*, Optical Technologies, USA, 6 chapitres.
- DAVIS, M. A., BELLEMORE, D. G. et KERSEY, A. D. (1997) *Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structural Components*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 45-57.

De VRIES, M., ARYA, V., MELLER, S., MASRI, S. F. et CLAUS, R. O. (1997) *Implementation of EFPI-based Optical-fiber Sensor Instrumentation for the NDE of Concrete Structures*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 69-79.

DONCASTER, A. M. (1997) *An Evaluation of Fibre Optic Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures* / Research Report No 1-1997. Copie du mémoire de maîtrise intitulé "An Evaluation of Fibre Optic Sensors for Remote Monitoring of Civil Engineering Structures. Faculty of Engineering, Technical University of Nova Scotia.

HABEL, W. R., HOFMANN, D. et HILLEMEIER, B. (1997) *Deformation Measurements of Mortar at Early Ages and of Large Concrete Components on Site by Means of Embedded Fiber-optic Microstrains Sensors*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 81-102.

HUSTON, D. R. et FUHR, P. L. (1998) *Distributed and Chemical Fiber Optic Sensing and Installation in Bridges*, Proc. of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, p. 79-88.

IDRISS, R. L., WHITE, K. R., PATE, J.W., VOHRA, S.T., CHANG, C. C., DANVER, B. A. et DAVIS, M. A. (1998) *Monitoring and Evaluation of an Interstate Highway Bridge Using a Network of Optical Fiber Sensors*, Proc. of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, p. 159-167.

ISIS CANADA, (année de parution indéterminée) *Installation of Optical Fiber Sensors*, The Technology Resource Center. 5 p.

KALAMKAROV, A. L., FITZGERALD, S. B. et MACDONALD, D. O. (1997) *On the Processing and Evaluation of Smart Composite Reinforcement*, Proceedings of SPIE, Vol. 3241, Smart Materials, Structures, and Integrated Systems, Adélaïde, Australie, 11-13 Décembre 1997, p. 338-346.

KIM, K.-S. et PAIK, S.-H. (1997) *Optical Fiber Monitoring System of Bridges in Korea*, International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, California, September 18-20, 1997, p. 555-563.

MAASKANT, R., ALAVIE, T., MEASURES, R. M., TADROS, G. RIZKALLA, S.H. et GUHA-THAKURTA, A. (1997) *Fiber-optic Bragg Gratings Sensors for Bridge Monitoring*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 21-33.

MAASKANT, R., ALAVIE, T et MEASURES, R. M. (1998) *A Recent Experience in Bridge Strain Monitoring with Fiber Grating Sensors*, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, 1998, p. 129 à 135.

MASMOUDI, R. (1995) *Évaluation expérimentale et théorique du comportement à la flexion de poutres en béton armé de barres composites à base de fibres*, Thèse de doctorat es sciences appliquées, Département de génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada. 212 p.

MASRI, S. F., AGBABIAN, M. S., ABDEL GHAFAR, A. M., HYGAZI, M. CLAUS, R. O. et DEVRIES, M. J. (1994) *Experimental Study of Embedded Fiber Optic Strain Gauges in Concrete Structures*, ASCE-EMD, vol. 120, ASCE, New-York, p. 1696-1717.

MICHIE, W. C., CULSHAW, B. MCKENZIE, I., MORAN, C., GRAHAM, N. B., GARDINER, P. T., CARLSTROM, B. ET BERGQVIST, E. (1994) *Distributed Measurements of Moisture Ingress and Cimentitious Grout*, Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications Symposium Proc., Northwestern University of Chicago, Il. p.453-460.

MICHIE, W. C., CULSHAW, B., MCLEAN, A., KONSTANTAKI, A. et HADJILOUCAS, S. (1997) *Distributed Water Ingress and Water Potential Measurements using Fibre Optics*, Cement and Concrete Composites No 19, p. 35-44.

NANNI, A. (1993) *Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, Developments in Civil Engineering, 42 Elsevier, Amsterdam, 450 p.

NELLEN, M., FRANK, A., MAURON, P. et SENNHAUSER, U. (1998) *Lifetime and Reliability of Embedded Optical Sensor Fibers*, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, 1998, p. 183 à 193.

NEWHOOK, J. P. et MUFTI, A. A. (1996) *Steel-Free Concrete Bridge Deck – The Salmon River Project: Experimental Verification*. Proceedings of 1st Structural Specialty Conference, Annual Conference of CSCE, Edmonton, Alberta vol. IIa, p. 123-134.

NEWHOOK, J. P., MUFTI, A. A., JEAGER, L. G., MACDONNELL, R. et HAMILTON, D. (1996) *Steel-free Concrete Bridge Deck - The Salmon River project: Design and Construction*, Proceedings of 1st Structural Specialty Conference, Annual Conference of CSCE, Edmonton, Alberta vol. IIa, p. 203-214.

QUIRION, M. et BALLIVY, G. (1998) *Revue de la technologie des capteurs à fibre optique et applications en génie civil*, Cinquième colloque du CRIB-Sherbrooke sur les infrastructures de béton/Nouvelles techniques d'auscultation et d'instrumentation. p.47-66.

RICKA, J. et TANAKA, T. (1984) *Swelling of Ionic Gels: Quantitative performance of the Donnan theory*, Macromolecules, 17(2), p. 2916-2921.

ROBERT, J.-F. (à paraître) *Évaluation de la durabilité en milieu alcalin des armatures à base de fibres de verre pour les structures de génie civil en béton armé*, Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Département de génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 148 p.

ROBERTS, S.S.J. et DAVIDSON, R. (1992) *Méchanical properties of composite Materials Containning Embedded Fiber Optic Sensors*, Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. 1588, p. 326-341.

ROCTEST LTD (1997) *Instruction Manual, Sensoptic Fiber-Optic Sensors, Fabry-Perot Strain Gage, Model SFO-FP*, Roctest Ltd, 665 Pine, St-Lambert, Québec, Canada. 12 p.

ROCTEST LTÉE (1996) *Manuel d'instructions, capteurs à fibre optique Sensoptic, Modèle: Jauge de déformation enfouie EFO*, Roctest Ltée, 665 Pine, St-Lambert, Québec, Canada, 12p.

ROSSI, P. et LEMAOU, F. (1989) *New Method for Detecting Cracks in Concrete Using Fiber Optics*, RILEM Mater. Struc., 22, p. 437-442.

SENNHAUSER, U., BRÖNNIMANN, R. MAURON, P. et NELLEN, M. (1998) *Reliability of Optical Fibers and Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring*, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, 1998, p. 117 à 128.

SIROIS, C. (1998) *Étude de la durabilité des armatures en fibres de verre sous tension dans un milieu alcalin*, Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Département de génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 140 p.

SURMELY, P. (1995) *La fibre optique - Technologies et applications*, Masson, 223 p.

THÉRIAULT, M. (1998) *Flexion, déformabilité et procédures de design de poutres et de dalles en béton armé de barres en matériaux composites*, Thèse de doctorat es sciences appliquées, Département de génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 331 p.

UDD, E., (1995) *Fiber Optic Smart Structures*, Edited by Eric Udd. 671 p.

VOHRA, S. T., CHANG, C. C., DANVER, B.A., ALTHOUSE, B., DAVIS, M. A. et IDRIS, R. (1998) *Preliminary Results on the Monitoring of an In-Service Bridge Using a 32-Channel Fiber Bragg Grating Sensor System*, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, New-Jersey Institute of Technology, May 3-6, 1998, p. 148 à 158.

YEH, C. (1990) *Handbook of Fiber Optics - Theory and Applications*, Academic Press inc., 382 p.

ANNEXE A

MÉTHODES DE COLLAGE DES CAPTEURS À FIBRE OPTIQUE

ROCTEST LTD (1997) Instruction Manual, Sensoptic Fiber-Optic Sensors, Fabry-Perot Strain Gage, Model SFO-FP. Roctest Ltd, 665 Pine, St-Lambert, Québec, Canada, p. 3-6.

ISIS CANADA, (année de parution indéterminée) Installation of Optical Fiber Sensors. The Technology Resource Center. 5 p.

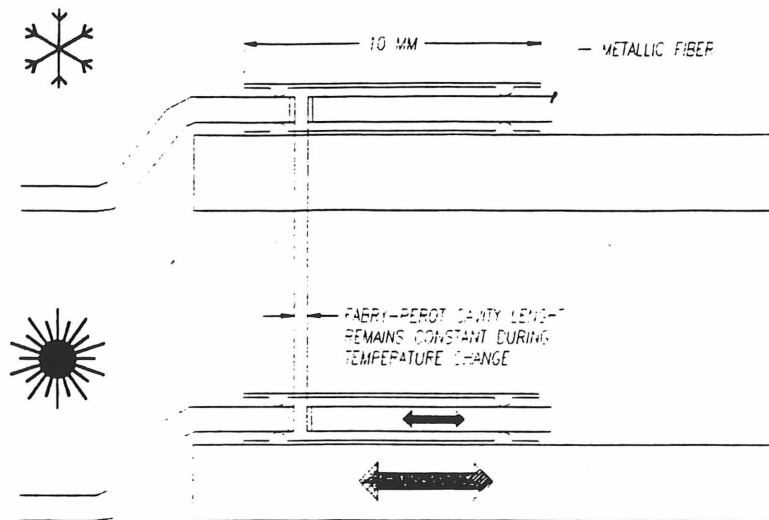


Figure 2: Principle of self-compensation mechanism.

3. INSTALLATION PROCEDURE

3.1 Installation procedure

The steps for bonding the fiber optic strain gages depend upon the adhesive used. Epoxy and ceramics adhesives and even metal arc spraying can be used to bond gages. As with conventional strain gages, high residual compression strain occurs when adhesive is heat cured at elevated temperature. When gages adhered to the piece at elevated temperature, compressive strains are generated in the gages as the piece cools down. Residual compression strain can be controlled by curing the adhesive while the piece is put into tension prior to cooling, or consideration may be given to this behavior while ordering the gages. Contact factory for information.

Roctest suggest using the M-BOND AE-10 or GA-2 epoxy adhesive from MEASUREMENTS GROUP (Micro-Measurements Division) for low temperature applications up to 95 °C. M-BOND AE-10 gives better adhesion, while the higher viscosity of the GA-2 makes it easier to use. For high temperature applications we recommend the use of the AE-15 or the M-BOND 600 (up to 370 °C short term and 260 °C long term). The mixing instructions and adhesive characteristics are given by the adhesive manufacturer. Roctest recommend on speed mixing the resin and hardener of the epoxy adhesive slowly to prevent entraining excessive amount of air (bubbles). The basics steps for bonding strain gages with GA-2 or AE-10 epoxy from MICRO-MEASUREMENT are given in the next paragraphs. To follow these steps properly you will need standard epoxy adhesive like 5-minutes type epoxy, adhesive tape such as electrical tape and "Scotch" tape or Mylar tape. Remember: the key for successful bounding of strain gage is to have a good contact between the gage and the specimen to measure

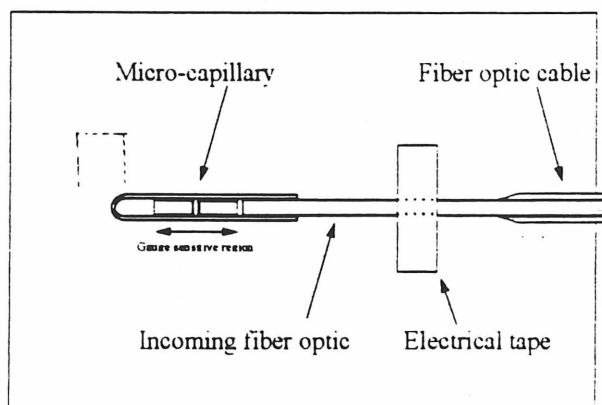
STEP 1

The surface preparation technique is the same basic procedure as for conventional strain gages. The surface must be cleaned. Follow the instruction given by your adhesive manufacturer. If you use adhesive from MEASUREMENTS GROUP (Micro-Measurements Division), follow the surface preparation procedure provided with the adhesive (see step 1 to 3 with AE-10, AE-15 and GA-2 instructions).

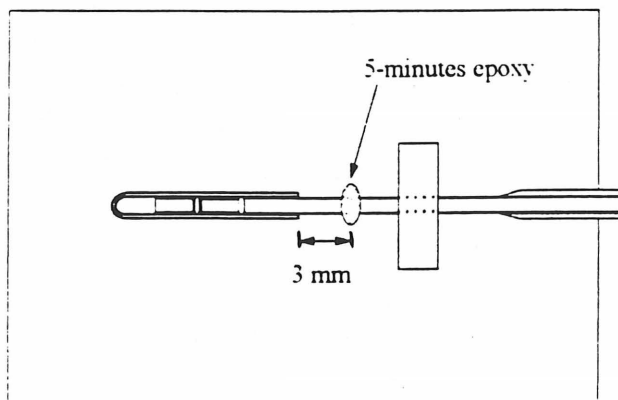
NOTE: To avoid surface contamination, do not touch the Fiber Optic Strain Gages with your hands. The gage micro-capillary must be free of grease, dust, etc. If necessary, use low lint wipers such as Kimwipes wipers for cleaning the gage micro-capillary. Gently and slowly wipes the micro-capillary with the dry wipers to remove the excess of dust.

STEP 2

The fiber optic gage is first hold in place by applying a piece of electrical tape ("scotch" tape may also be used) on the incoming fiber optic 2.5 cm away from the micro-capillary. Position the gage on the plate and tack the tape to maintain proper alignment. The sensitive area is collinear to the axis of the fiber. The location of the sensitive area of the gage is shown on the box cover that contain the fiber optic gage. If the gage is not in good contact with the specimen another piece of Scotch tape or Mylar adhesive tape may be applied, **with caution!**, at the tip of the gage (over 1 mm only).



STEP 3



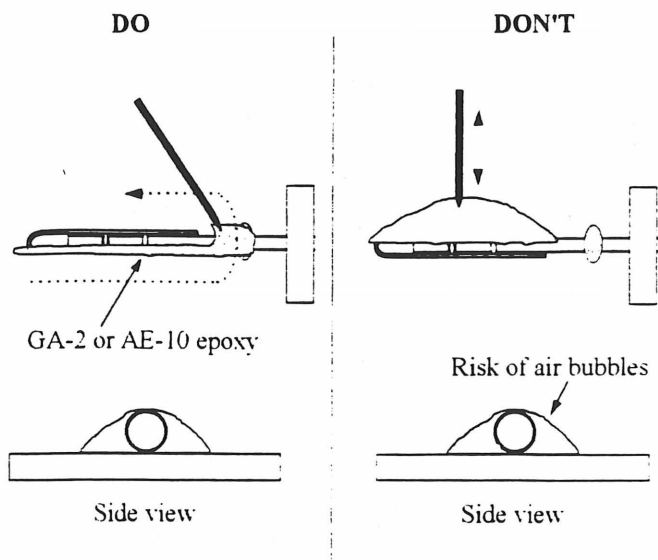
The incoming fiber optic must then be secured on the specimen with a very small drop (less than 1 mm) of 5-minutes epoxy about 3 mm away from the micro-capillary. The purpose of this step is to maintain the gage alignment while the AE-10 or GA-2 epoxy will be applied or cured.

CAUTION: To ensure that the 5-minutes epoxy will not flow to the micro-capillary, it is recommended to let it cure slightly

before using in order to increase its viscosity.

STEP 4

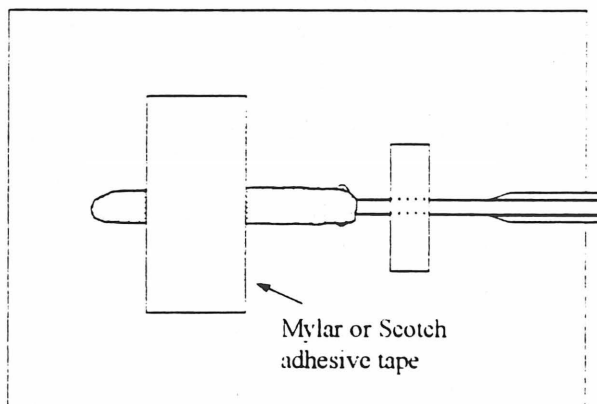
Once the 5-minutes epoxy is cured, gently remove the tape at the tip of the gage if you had applied one. Apply AE-10 (or other adhesive) slowly using a linear motion parallel to the gage orientation. Make sure the entire gage is covered from the tip to the 5-minutes epoxy.



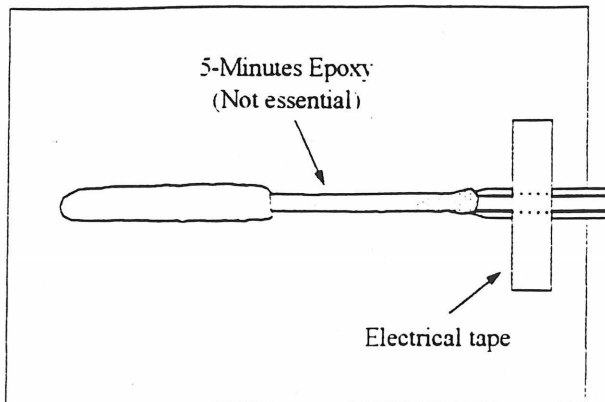
REMAINDER: To prevent entraining air (bubbles), the adhesive must be applied in the direction collinear to the gage.

STEP 5

A Mylar adhesive tape (a "scotch" tape may also be used) should be applied over the adhesive where it covers the gage sensitive region in order to keep the gage in good contact with the specimen while the adhesive is cured. Do not apply excessive pressure while applying the tape over the micro-capillary. This tape can be removed after curing. It is preferable to let the adhesive cure at room temperature. Then, cure the adhesive for two hours at least 15 °C above the maximum operating temperature. Note that the residual compression may increase with increasing curing temperature.



STEP 6



You may remove all tape and then apply 5-minutes epoxy (if the gage is used at low temperature) over the remaining unprotected fiber optic up to the fiber jacket. Then use electrical tape to attach the fiber optic cable to the structure.

3.2 Mating the gages to the FIZ-100 instrument

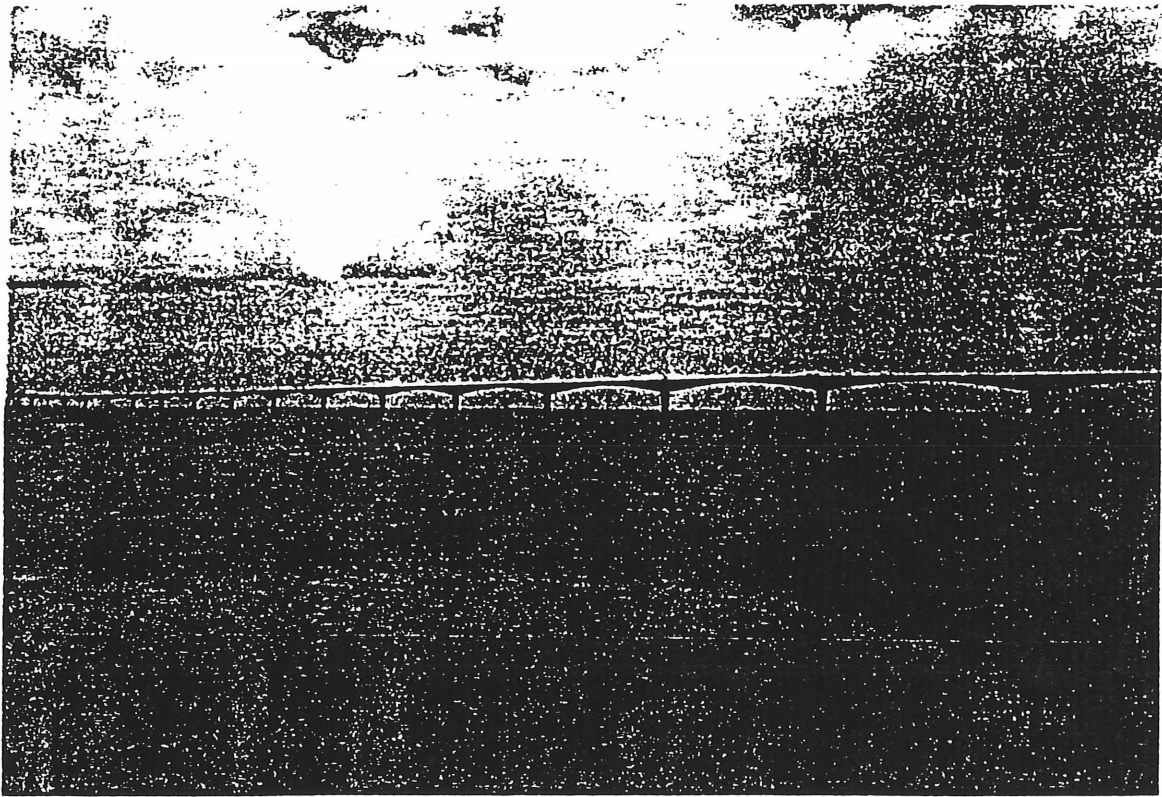
Before installing and using the gage, you must read and understand the operating manual of the readout FIZ-100.

First of all, you must define the gage within the FIZ-100 memory. To do this, you must enter its gage factor (7 digit number, example: 1004103) in the permanent memory of the readout. To do this operation, refer to the operating manual in section GAUG MENU. The FIZ-100 uses this information to determine sensor type and range. Full-scale range linearity and display in engineering units (micro-strains) is then available without further treatment by software or calibration by a microchip which would be included in the sensor.

After the gage has been defined, you can connect the gage in the FIZ-100 readout in any channel and go in the GAUG menu and choose the SEL sub-menu to assign the gage to a specific channel. For more informations for this step, refer to the FIZ-100 operating manual.

For proper use of the fiber optic strain gages, the gage fiber optic connector must be kept clean and free of dust at all times. Any dust may obstruct the light transmitted from one connector to the other, and reduce the signal-to-noise ratio to an unusable level. The FIZ-100 or FIZ-10 input connectors must be clean as well. Those connectors can be cleaned with the Fiber Optic Connector Cleaning kit but it is a good practice to ALWAYS clean the gage connector before mating to the instrument. Gage connectors can be cleaned by wiping the end with a soft tissue such as Kimwipes tissues.

Installation of Optical Fiber Sensors The Technology Resource Center





Introduction

Fiber optic Bragg gratings make very sensitive, rugged, and versatile structural sensors. The following material is intended to help those wishing to undertake structural monitoring with this new form of strain gauge. Further assistance is available from the ISIS Technology Resource Center. Call (416) 667 7732 or (416) 667 7928.

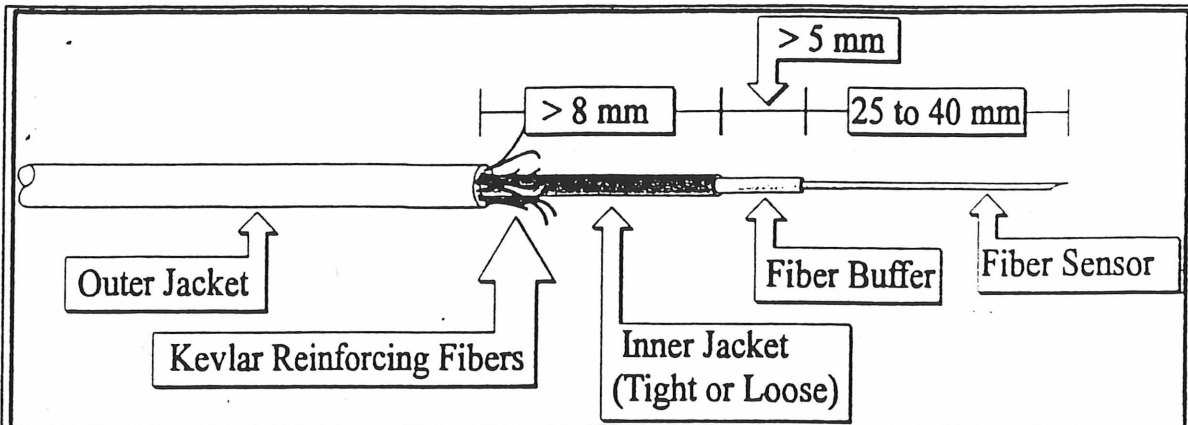


Figure 1: Bondable Sensor

Installation Of Sensors

Sensor Preparation

Optical fibers consist of a silica glass core and cladding. Light is guided by the core and can propagate over substantial distances. An optical fiber is generally protected by a series of coatings and jackets depending on the specific handling requirements, Figure 1.

Although optical fibers are very strong, the long term durability required for sensing applications require that they be handled very carefully to avoid surface abrasion. As well, long term installations must be protected from moisture. An acrylate or polyimide buffer coating provides the fiber with preliminary protection in this regard. An inner jacket, either tightly bound to the fiber or in the form of a loose tube, and an outer PVC jacket along with Kevlar reinforcing fibers, provide further mechanical and environmental protection.

The sensor itself when prepared for bonding with the jackets and coating removed can be easily damaged thus compromising its high inherent strength. Care must be taken to avoid any contact with the unprotected section of optical fiber. The sensor should be held by the jacketed portion of the optical fiber and the sensor section should not be placed on any surface which has not been previously cleaned with adhesive.

For those unfamiliar with the handling of optical fibers, it is suggested that some fiber handling experience be acquired with lengths of conventional optical fiber that do not contain the costly sensor.

Surface Bonding Bare Fiber Sensors On Structures

The bonding of optical fiber sensors is a critical step in obtaining precise strain information from the host material. The installation procedure described below addresses the important issues of effective host to sensor strain transfer and bond uniformity. Before installation of a bare fiber sensor please examine the optical fiber sensor tip carefully, but do not remove from it from its original packaging. Undamaged sensors will have a 25 to 40 millimeter length of bare fiber protruding from the buffered fiber.

The center of the optical fiber sensor is located at the midpoint between the tip of the bare fiber sensor and

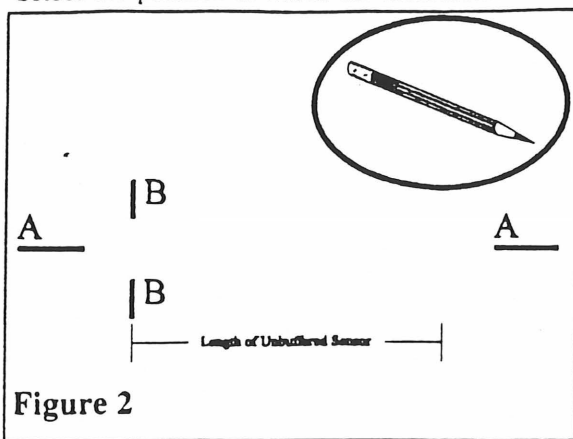


the beginning of the buffered portion of the optical fiber.

Handle sensors with extreme care as the sensor tip is precisely manufactured for optimal performance.

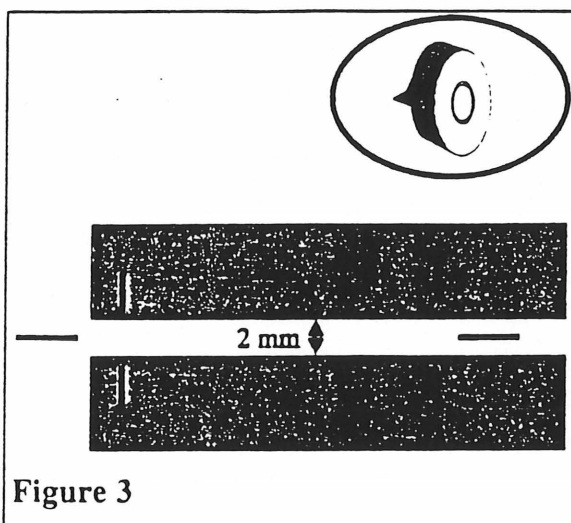
The following diagrams indicate the steps to follow for correct sensor bonding.

Select the position at which the measurement is to be made. Thoroughly clean the bonding area with an



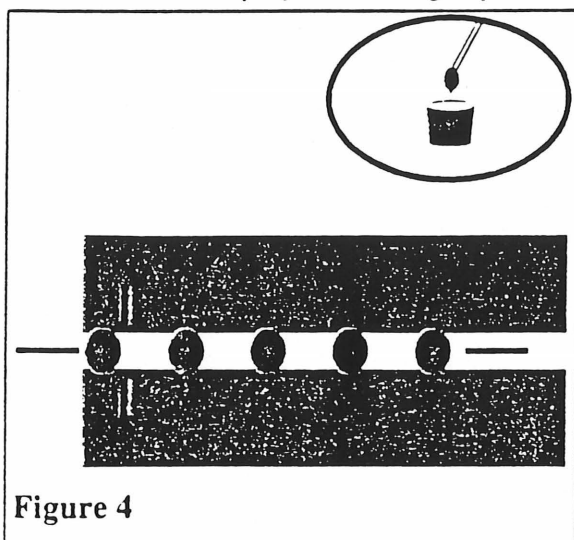
ethanol or acetone wetted lintless tissue. Measure the bare fiber portion of the sensor from tip to the beginning of the buffer; see Figure 2. With a lead pencil, make two marks (A) along the projected bond line approximately 5 to 6 centimeters apart. Indicate, as well, with two subsequent markings (B), the projected position of the bare fiber/coated fiber interface.

With flashbreaker tape, create a "channel" into which the optical fiber sensor will ultimately be positioned.



Create this channel, of width approximately 2 mm, by the positioning of two lengths of flashbreaker tape parallel to the envisioned bond line. The channel should extend one centimeter beyond the two ends of the bare fiber portion of the optical fiber sensor.

Mix the adhesive epoxy in a mixing cup following the directions of the adhesive manufacturer. For



example, with Micro-Measurements AE-10 epoxy, it is our experience that adhesives are well dispensed using syringes. A 1 ml. syringe should be used to dispense the catalyst and a 5 ml. syringe to dispense the resin. A small portion of resin may be poured into a drawing bottle to make it easier to fill the syringe. *It is also our experience that a resin : catalyst ratio of 1: 0.175 by volume yields good adhesion.* Distribute the epoxy in small beads every 4 to 6 millimeters along the projected bond line. Do not position the sensor at this time.



With an epoxy stir stick or plastic applicator, smooth the beads into one continuous line of epoxy over the projected bond line. By eye, attempt to keep the adhesive depth uniform. This depth should not exceed 1 mm over the complete bond length. With the epoxy stir stick, carefully remove any epoxy that may have spilled out onto the flashbreaker tape, intermittently cleaning the epoxy stir stick with a lintless tissue.

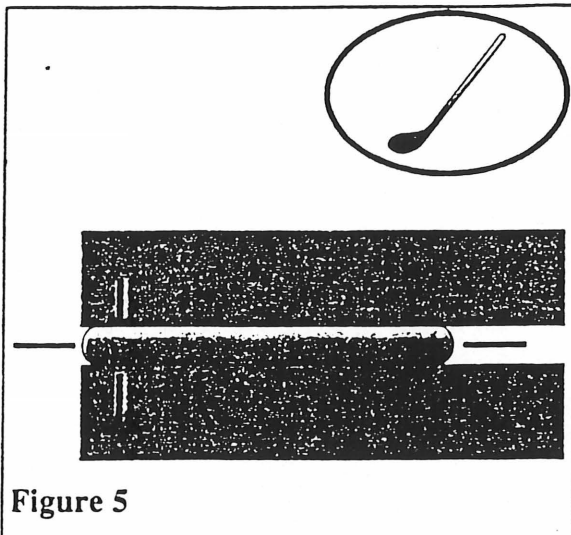


Figure 5

Carefully remove the sensor from its packaging. Handle the sensor by the inner or outer jackets. *Do not grasp the sensor by the bare fiber portion.* Liberally, wet a lintless tissue with ethanol or acetone and *very gently* clean the sensor. Position the bare portion of the optical fiber into the epoxy, aligning the buffer/bare fiber interface with the appropriate pencil mark. Gently, but firmly, attach the buffered portion of the fiber to the bonding surface with flashbreaker tape. Attach the outer jacket to the surface with flashbreaker tape as well. Dab a circle of epoxy over the interface between the outer and inner jackets. This will serve as a permanent stress relief to protect the sensor from pulls and tugs.

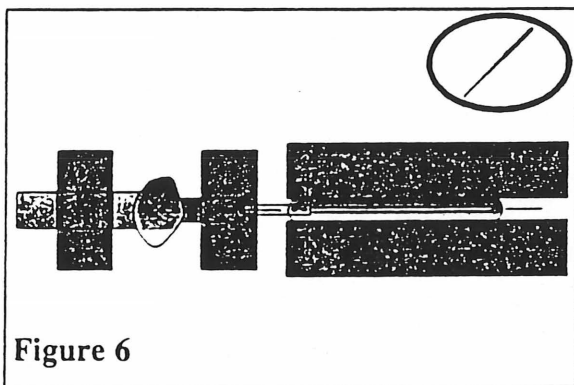


Figure 6

With the epoxy stir stick repeat the procedure of the previous step by removing any excess epoxy that may have spilled onto the flashbreaker tape. If necessary, use the epoxy stir stick to gently nudge the bare fiber sensor to align it with the pencil markings.

Allow the epoxy to set for 30 minutes. Remove the flashbreaker tape channel. Allow epoxy to fully cure according to manufacturer specifications. (6 hours at room temperature for AE-10).

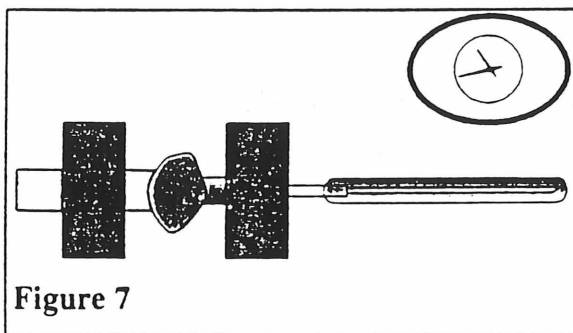
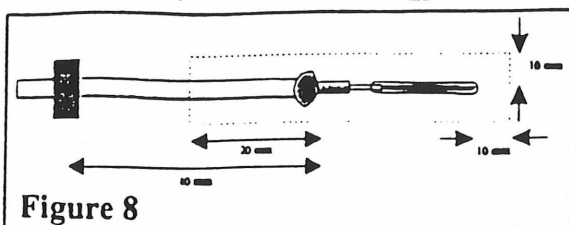


Figure 7



After the epoxy has been adequately cured the sensor is ready for operation. In some circumstances, the



epoxy coated sensor is adequately protected by the epoxy itself. It is recommended however that additional mechanical and environmental protection be provided to ensure long term durability. For this purpose nitrile rubber sealant and butyl rubber sheets are useful. These should be installed according to the manufacturer's instructions

with the following guidelines.

Apply tape to secure the fiber cable just outside of the gauge protection region, i.e. approximately 40 mm from the end of the outer jacket as shown in Figure 8. Carefully remove the two strips of tape in the sensor region. The region to be covered by the protective coating is outlined in the figure. It extends 10 mm beyond the epoxy adhesive on all sides and extends 20 mm from the end of the outer jacket. Seal the open ends of the outer and inner jacket with nitrile rubber sealant and apply a layer by brush to all of the exposed jacket and fiber within the sensor region. Thoroughly coat the outer jacket around its entire circumference as it exits the sensor region. Cut a piece of butyl rubber sealant sheet large enough to cover the entire sensor region defined above. Remove the protective paper from one side of the sealant and press the exposed side onto the surface of the installation beginning at the end and progressing toward the jacketed end. Apply a moderate amount of pressure to the bonded region and press firmly toward the edges of the installation. Only apply very light pressure to the rubber sheet in the region of the bare fiber and the inner jacket, taking care not to disturb the fiber as it exits the inner jacket. Carefully apply moderate pressure on both sides of the fiber and firm pressure toward the edges to promote proper bonding with the surface. Proceed to the end of the installation at the outer jacket, there gently squeezing the rubber sheet around the outer jacket to ensure a tight seal at the surface/jacket interface. When the installation is complete, seal the perimeter of the installation with nitrile rubber sealant, being especially thorough at the exit of the fiber jacket.

Secure the fiber cable at two locations beyond the sensor region to avoid any *tugging* loads at the sensor itself.

ANNEXE B

LISTE DES INSTRUMENTS DE MESURE DU PONT JOFFRE (10 pages)

SCHÉMAS DE LOCALISATION ET PHOTOGRAPHIES DES INSTRUMENTS DE MESURE
DU PONT JOFFRE (9 pages)

SUIVI DES CAPTEURS DU PONT JOFFRE (9 pages)

Tableau B.1 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS5)

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP	FO - LS5 - 1C	1	100 1827	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS5 - 2C	2	100 1840	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS5 - 4A	3	100 1503	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 4B	4	100 1467	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 4C	5	100 1500	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 5A	6	100 1598	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 5B	7	100 1459	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 5C	8	100 1430	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS5 - 7C	9	100 1733	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS5 - 8C	10	100 1754	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-1A	1	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-1B	2	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-2A	3	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-2B	4	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-3A	5	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-3B	6	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-6A	7	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-6B	8	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-7A	9	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-7B	10	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-8A	1	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS5-8B	12	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m

Tableau B.2 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS6)

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP	FO - LS6 - 1C	11	100 1710	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 2C	12	100 1668	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 4A	13	100 1711	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 4B	14	100 1817	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 4C	15	100 1805	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 5C	16	100 1798	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 7C	17	100 1691	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-FP	FO - LS6 - 8C	18	100 1770	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
FGS-10-005-FC-A	FOB-LS6-4D	33	GF: 07543 W: 1539135		-50+80°C	25 M
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-1A	13	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-1B	14	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-2A	15	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-2B	16	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-3A	17	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-3B	18	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-5A	19	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-5B	20	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-6A	21	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-6B	22	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-7A	23	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-7B	24	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-8A	25	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS6-8B	26	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m

Tableau B.3 **CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS7)**

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP-I	FO - LS7 - 1A	19	100 1531	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
SFO-FP-I	FO - LS7 - 1B	20	100 1492	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
SFO-FP-I	FO - LS7 - 1C	21	100 1489	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m

Tableau B.4 **CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS**
NEFMAC C19 (LS8)

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP-I	FO - LS8 - 1A	22	100 1499	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
SFO-FP-I	FO - LS8 - 1B	23	100 1534	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
SFO-FP-I	FO - LS8 - 1C	24	100 1568	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
FGS-10-005-FC-A	FOB-LS8-C2	35	GF: 0.7533 W: 1539380		-50+80°C	25 M
EA-06-250BF-350	ESG-LS8-3-2	501	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS8-3-1	502	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS8-4-2	503	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LS8-4-1	504	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m

Tableau B.5 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS9)

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP	FO - LS9 - 1A	25	100 1470	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS9 - 2A	26	100 1673	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS9 - 3A	27	100 1658	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS9 - 4A	28	100 1638	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
FGS-10-005-FC-A	FOB-LS9-B1	34	GF: 0.7555 W: 1538505		-50+80°C	25 M

Tableau B.6 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DU TREILLIS NEFMAC C19 (LS10)

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP	FO - LS10 – 1A	29	100 1465	-1 000 +10 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS10 – 2A	30	100 1707	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS10 – 3A	31	100 1984	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m
SFO-FP	FO - LS10 – 4A	32	100 1667	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	35 m

Tableau B.7 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DES ÉCHANTILLONS DÉCOUPÉS DU TREILLIS NEFMAC C19

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
SFO-FP	FO -LST	33	100 1389	-2 000 +8 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	1,8 + 30 m
FGS-10-005-FC-A	FOB LST	36	GF: 0.7546 W: 1539350		-50+80°C	25 M
EA-06-250BF-350	ESG-LST	01	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	02	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	03	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	04	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	05	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	06	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	07	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EA-06-250BF-350	ESG-LST	08	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m

Tableau B.8 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES UTILISÉES POUR L'INSTRUMENTATION DES POUTRES MÉTALLIQUES

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
CEA-06-W250A-350	ESG-A-H	201	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-A-M	202	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-A-B	203	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-B-H	204	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-B-M	205	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-B-B	206	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-C-H	207	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-C-M	208	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-C-B	209	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-D-H	210	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-D-M	211	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-D-B	212	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-E-H	213	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-E-M	214	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
CEA-06-W250A-350	ESG-E-B	215	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
SFO-W	FO - C-H	401	100 1710	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-W	FO - C-B	402	100 1668	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SFO-W	FO - C-M	403	100 1711	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
SM2-W	VW-C-H	301	0.3911*10 ⁹	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	20 m
SM2-W	VW-C-M	302	0.3911*10 ⁹	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	20 m
SM2-W	VW-C-B	303	0.3911*10 ⁹	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	20 m

Tableau B.9 CARACTÉRISTIQUES DES JAUGES NOYÉES DANS LA DALLE DE BÉTON

Type de jauge	# référence	Numéro d'identification	Facteur de jauge	Plage de lecture	Température	Câble d'extension
EGP-5-350	ESG-A-1	101	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-2	102	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-A-3	103	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-4	104	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-AB-1	105	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-BB-2	106	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-AB-3	107	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-BB-4	108	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-1	109	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-2	110	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-3	111	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-B-4	112	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-CB-1	113	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-CB-2	114	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-CB-3	115	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-CB-4	116	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-C-1	117	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-C-2	118	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-C-3	119	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-C-4	120	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-DC-1	121	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-DC-1	122	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-DC-2	123	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-AD-3	124	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-D-1	125	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-D-2	126	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-D-3	127	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-D-4	128	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m

EGP-5-350	ESG-ED-1	129	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-ED-2	130	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-ED-3	131	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-ED-4	132	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-E-1	133	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-E-2	134	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-E-3	135	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
EGP-5-350	ESG-E-4	136	2.08	18 000 $\mu\epsilon$	-75 +205°C	15 à 20 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-1	1	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-2	2	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-3	3	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-4	4	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-5	5	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
SVW-EM-5	SVW-EM-5-6	6	$4.062 \cdot 10^9$	3300 $\mu\epsilon$	-40+70 °C	30 m
EFO	FO-EM-1	666	100 1710	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
EFO	FO-EM-2	777	100 1710	-2 500 +5 000 $\mu\epsilon$	-100 +350°C	30 m
TFO-H	TFO-T-1	36	9142900	-100+260 °C	-100+260 °C	30 m
TFO-H	TFO-T-2	37	9191755	-100+260 °C	-100+260 °C	30 m

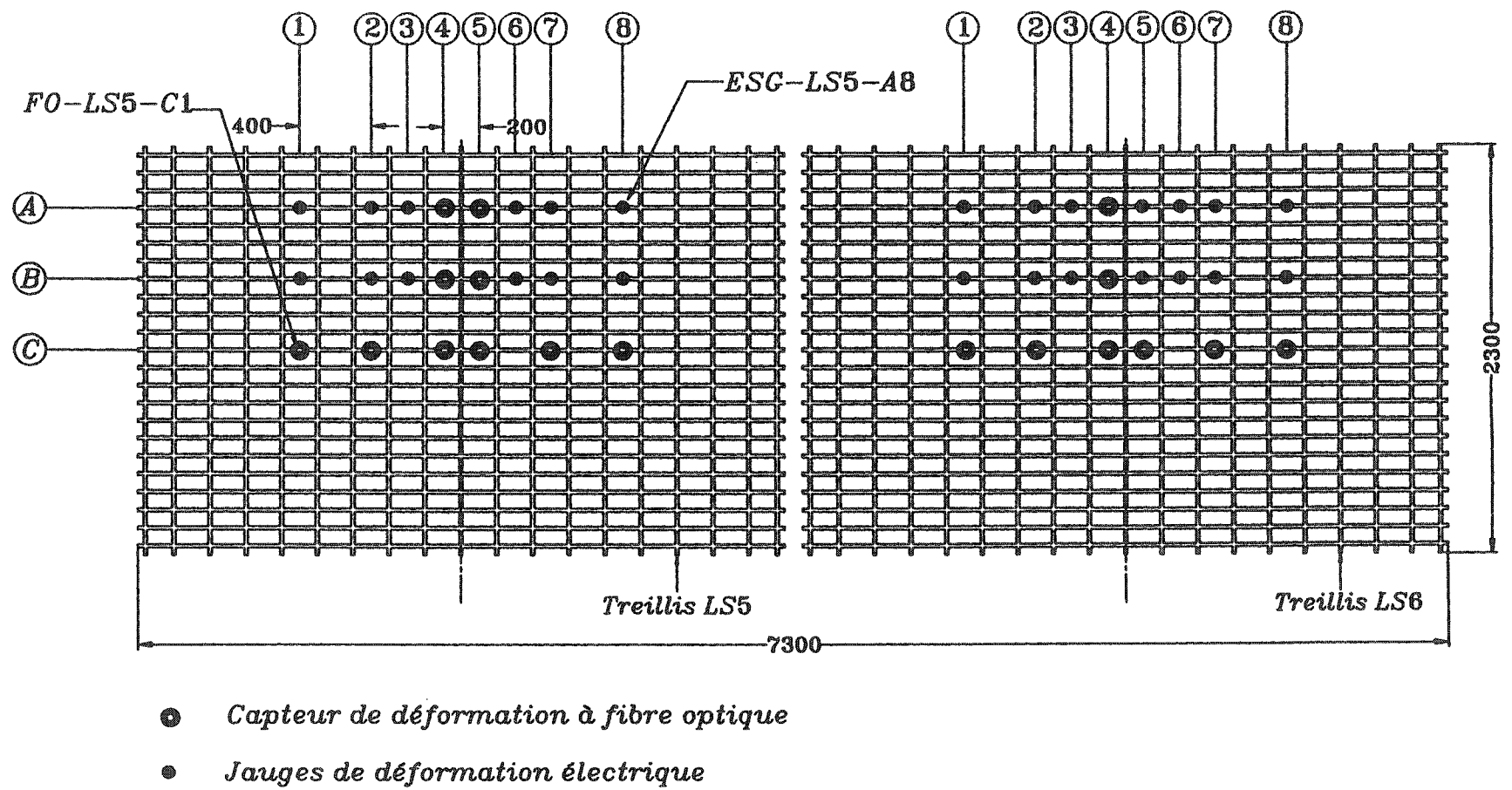
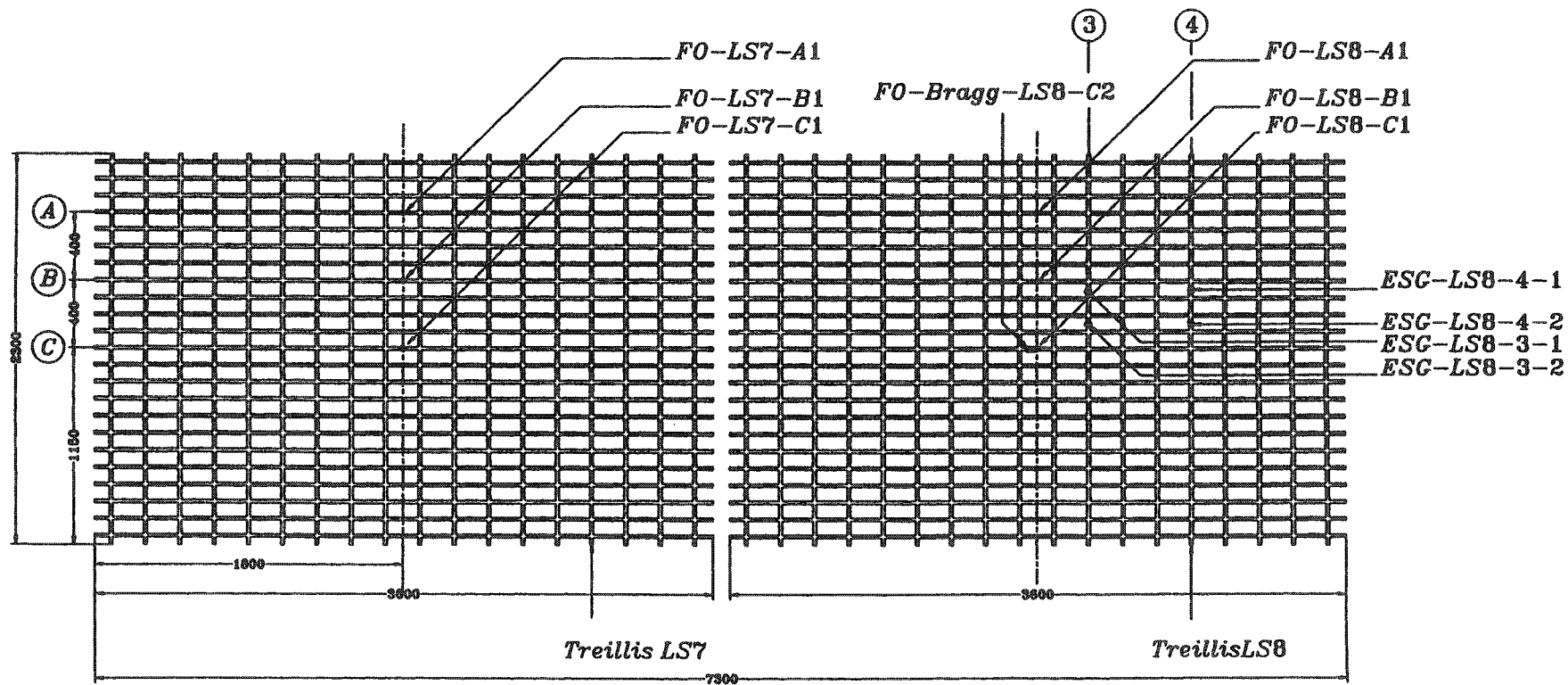


Figure B.1 Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS5 et LS6



FO : Capteur de déformation à fibre optique de type Fabry Perrot
 FO-Bragg : Capteur de déformation à fibre de type Bragg
 ESG : Jauge de déformation électrique

Figure B.2 Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS7 et LS8

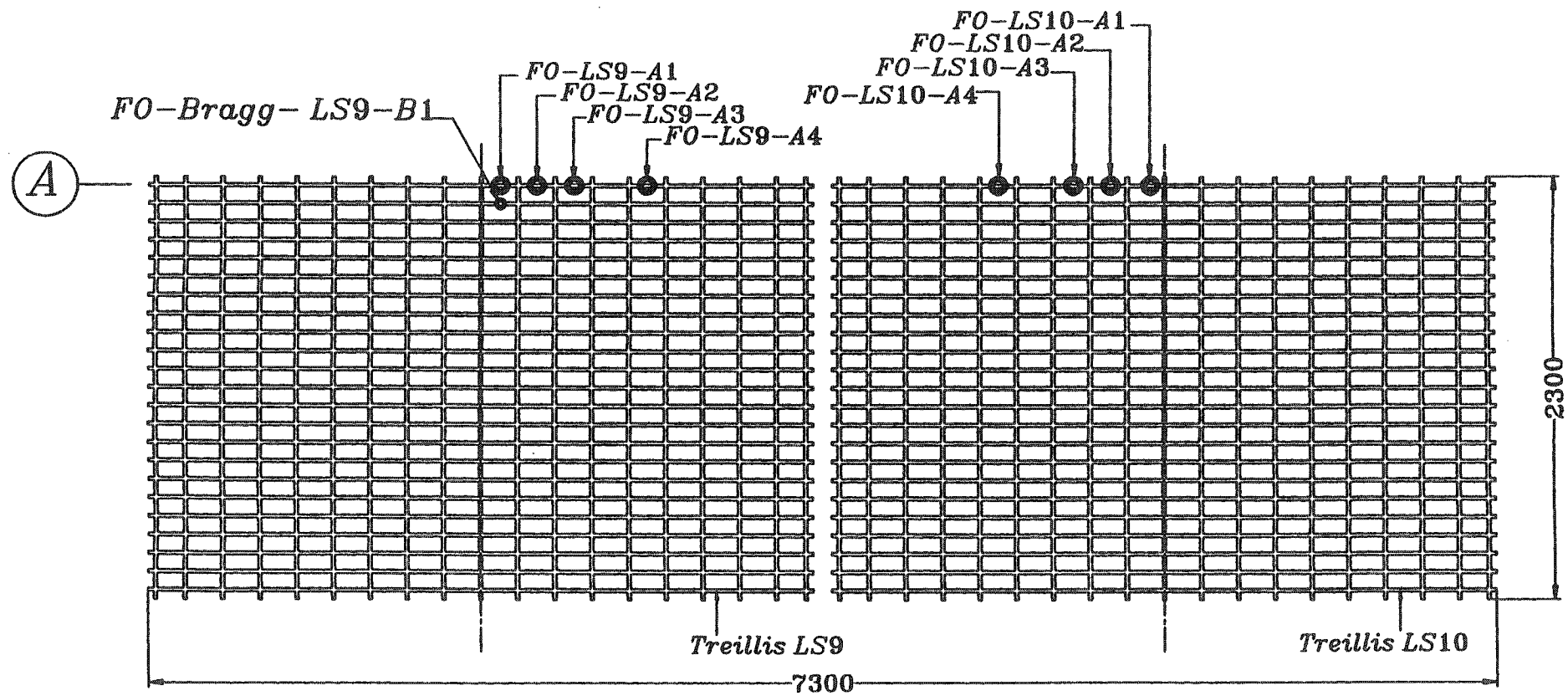


Figure B.3 Types et positions des instruments de mesure installés sur les treillis LS9 et LS10

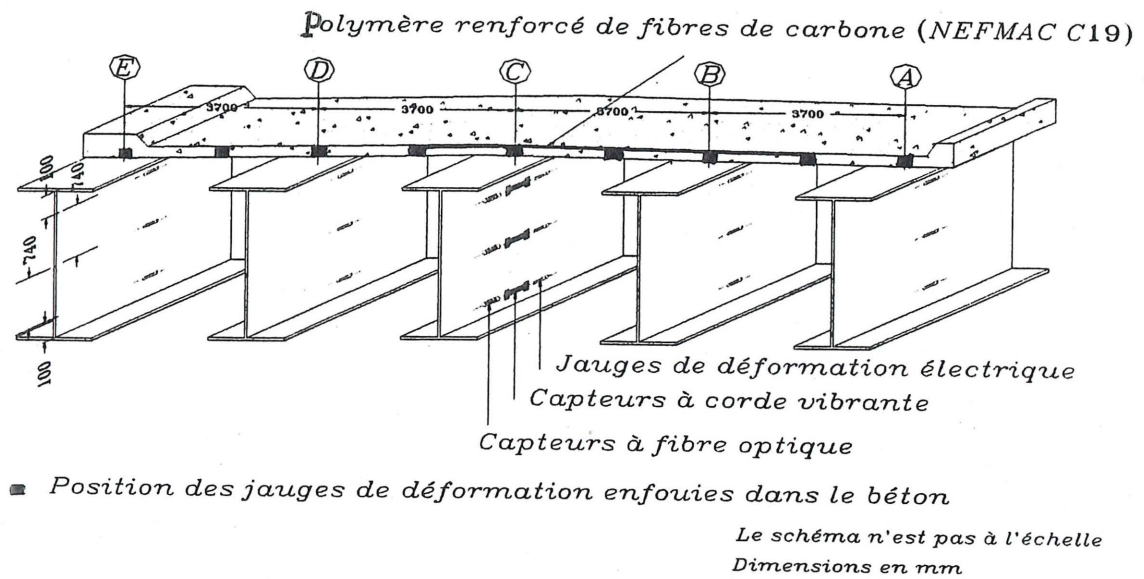


Figure B.4 Types et positions des instruments de mesure installés sur les poutres d'acier et blocs de jauges électriques noyées dans la dalle de béton

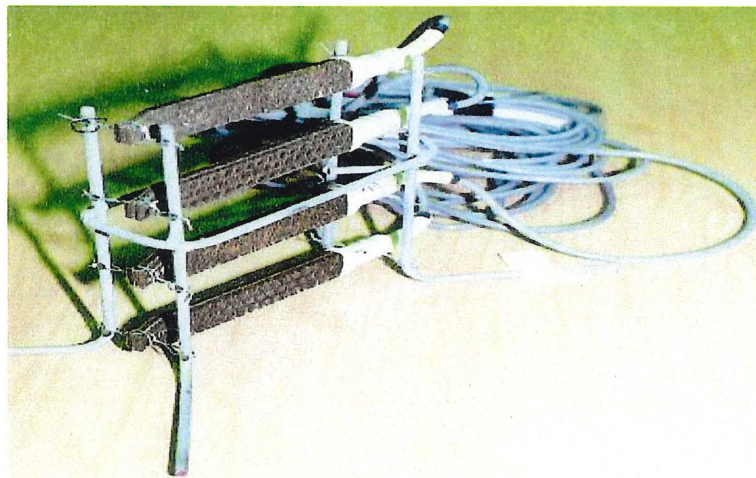


Figure B.5 Blocs de 4 jauges électriques noyées dans la dalle de béton

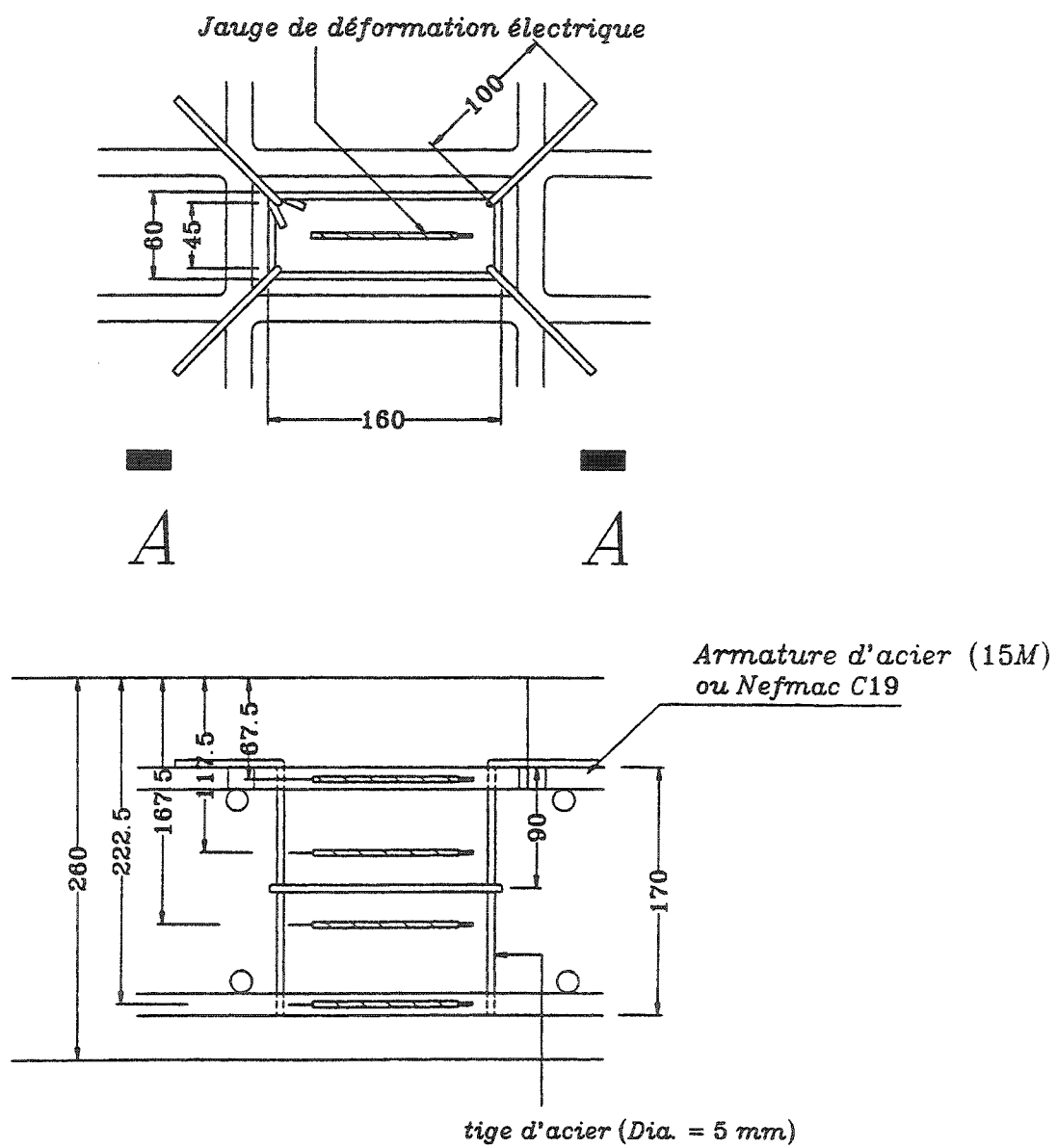


Figure B.6 Vue en plan et vue en élévation des blocs de jauges électriques

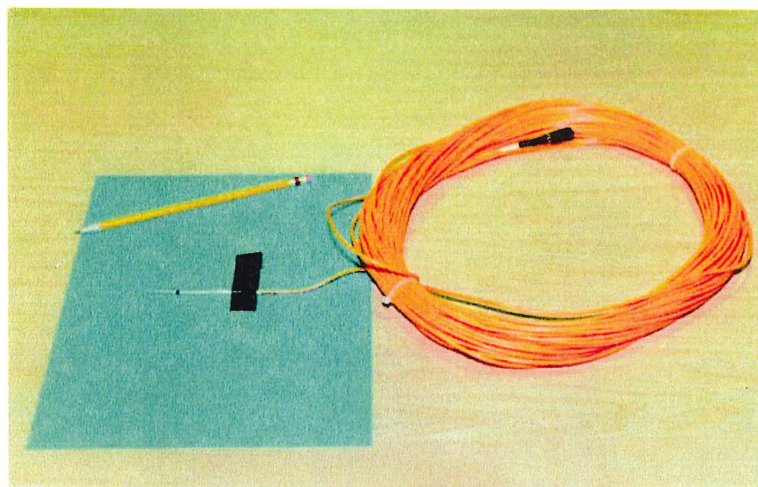


Figure B.7 Capteur de déformation à fibre optique SFO



Figure B.8 Échantillon témoin de treillis Nefmac C19 instrumenté d'un capteur SFO, d'un réseau de Bragg et d'une jauge électrique

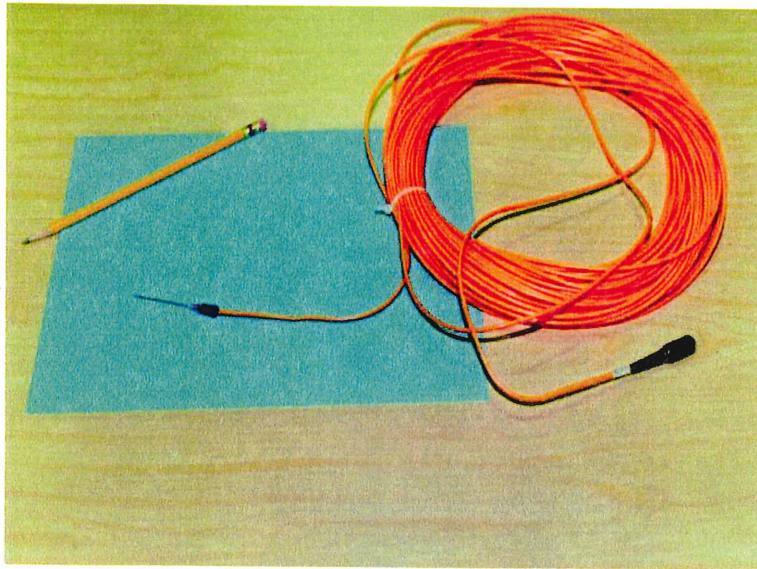


Figure B.9 Capteur de température à fibre optique TFO-H

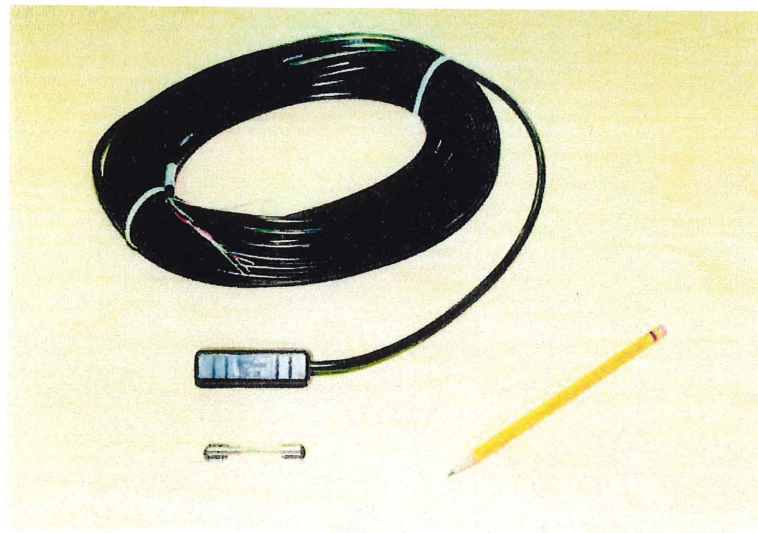


Figure B.10 Capteur de déformation à corde vibrante SM-2W

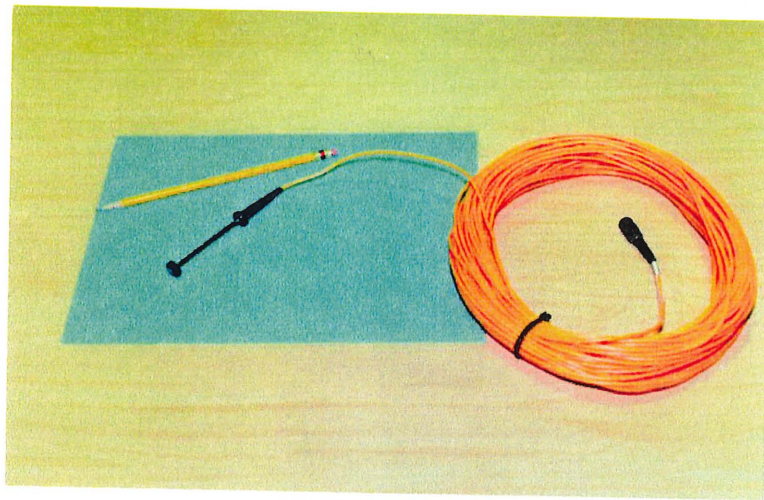


Figure B.11 Capteur de déformation à fibre optique EFO

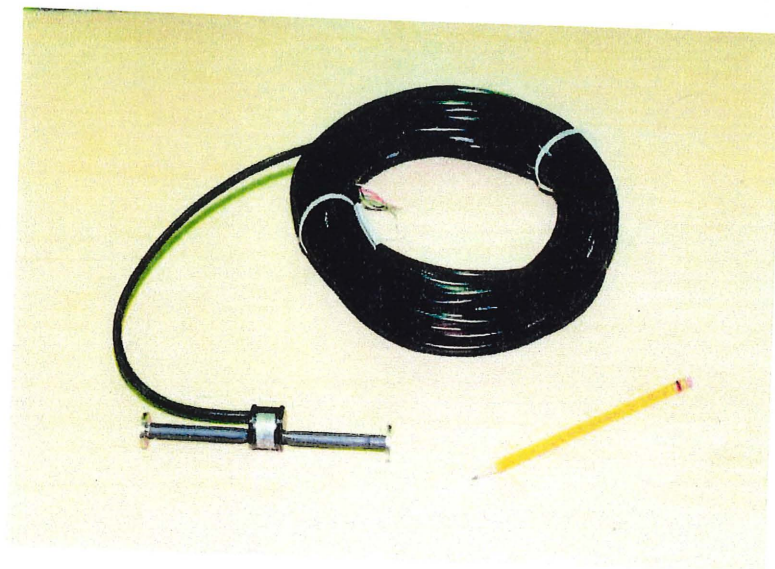


Figure B.12 Capteur de déformation à corde vibrante EM-5

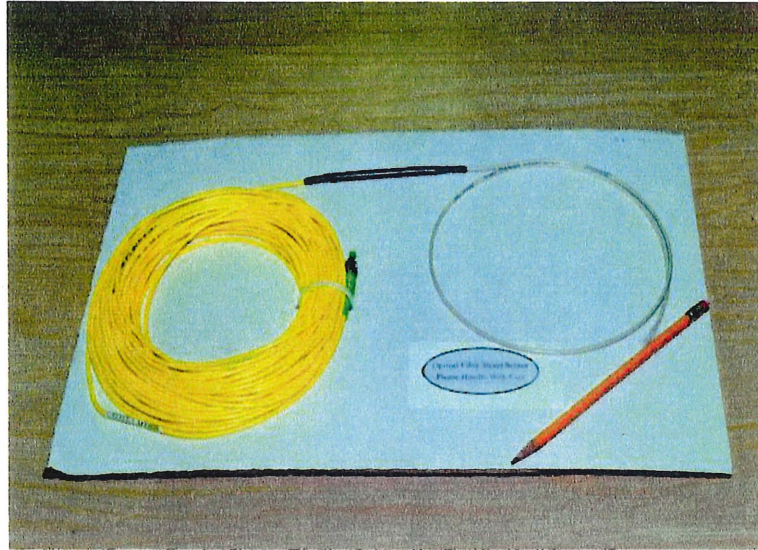


Figure B.13 Capteur de déformation à fibre optique réseau de Bragg

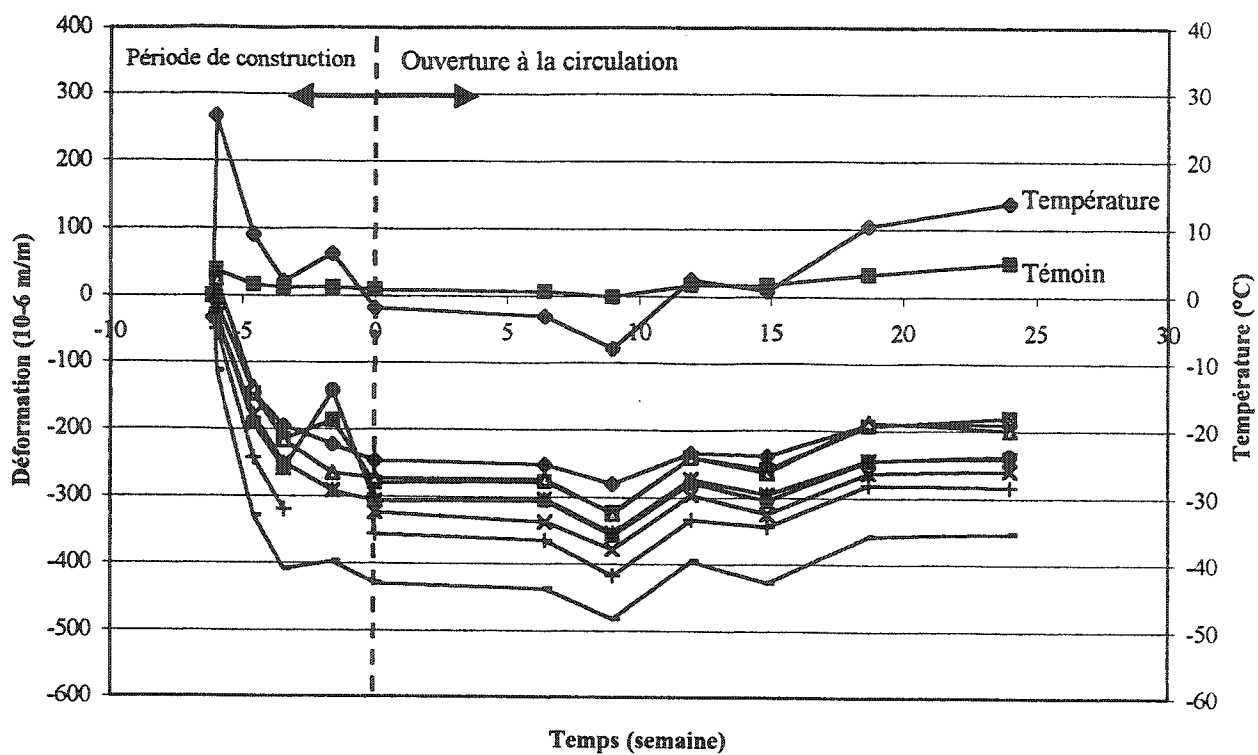


Figure B.14 Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS6

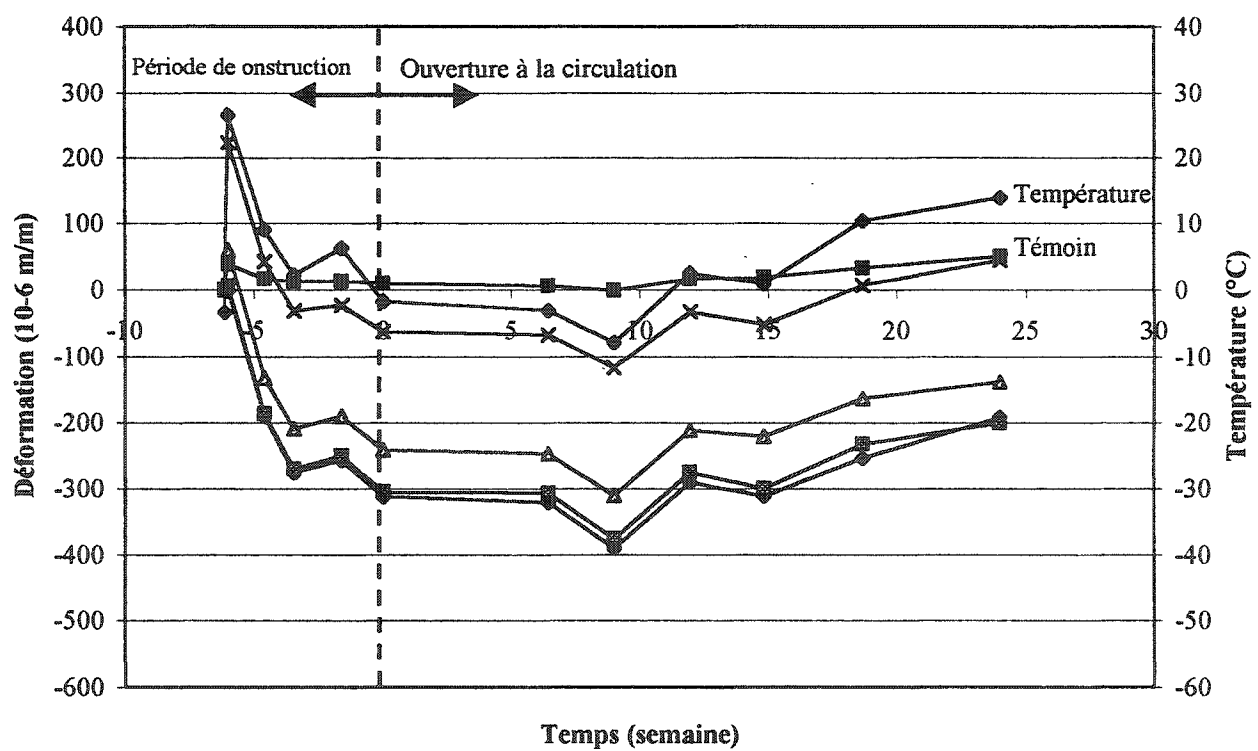


Figure B.15 Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS9

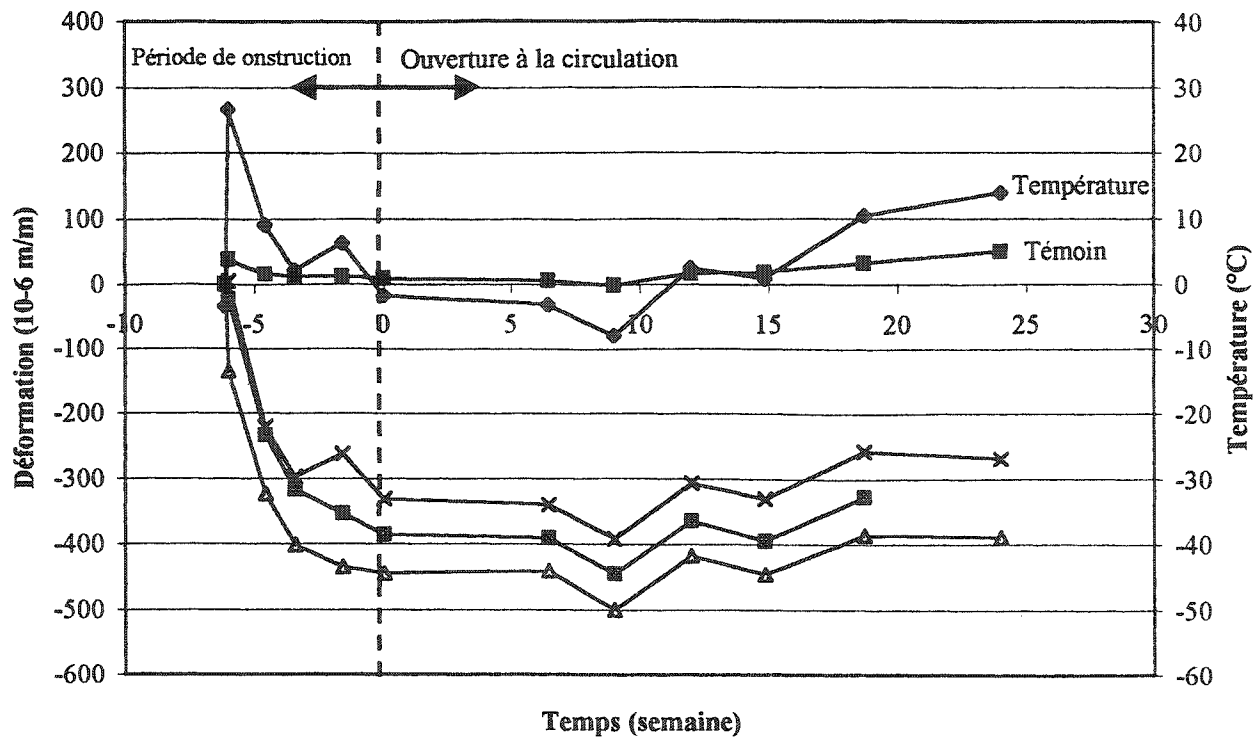


Figure B.16 Capteurs à fibre optique SFO collés sur le treillis Nefmac LS10

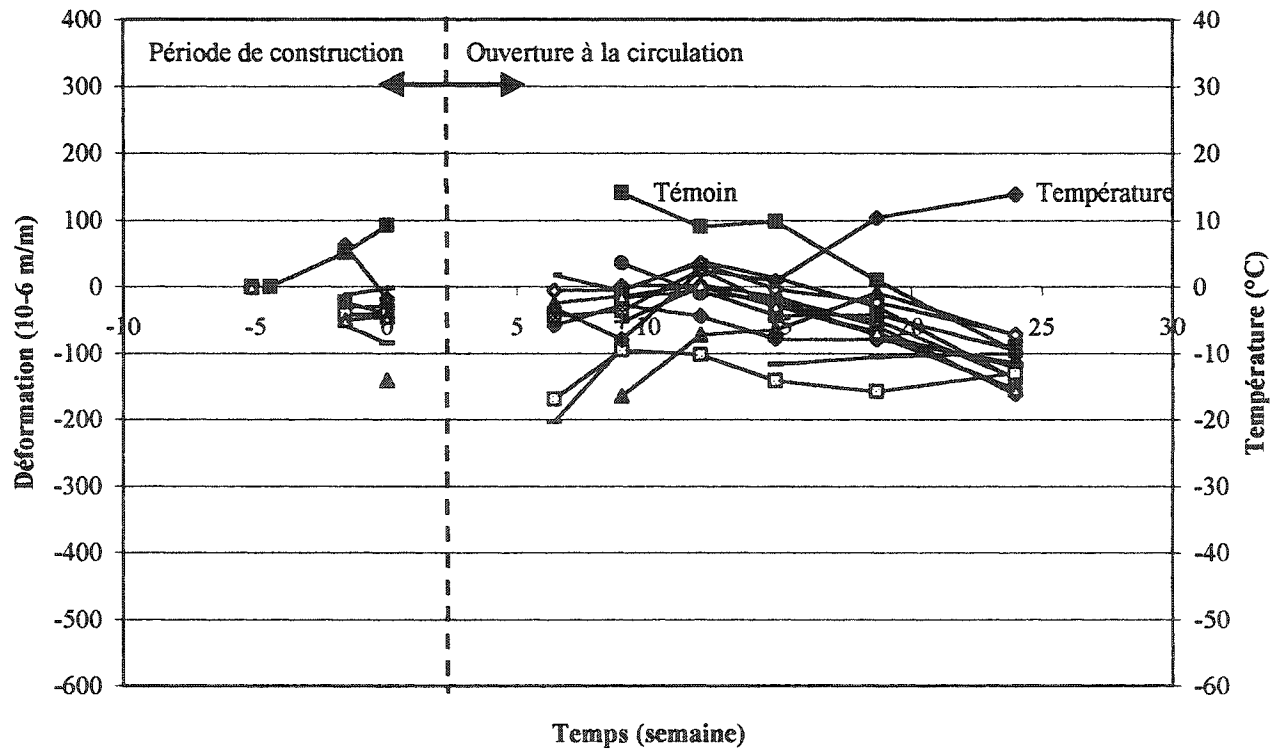


Figure B.17 Jauges électriques collées sur le treillis Nefmac LS5

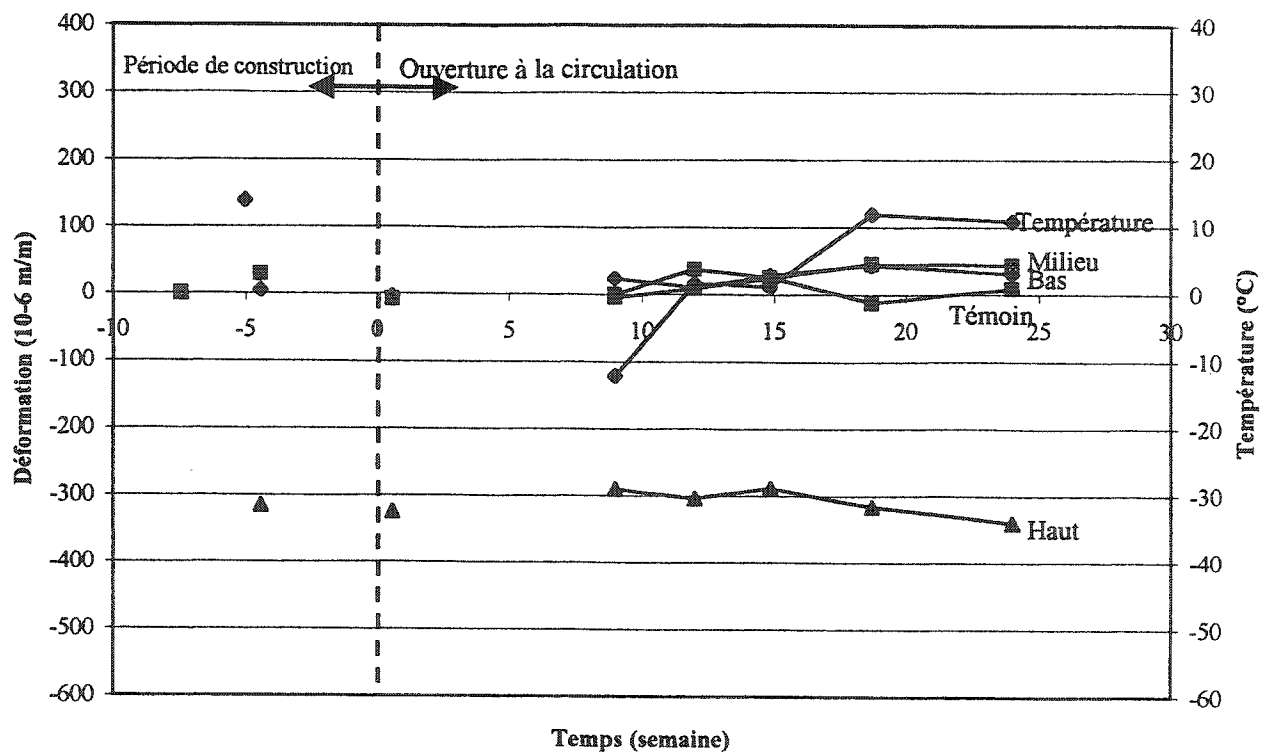


Figure B.18 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier A

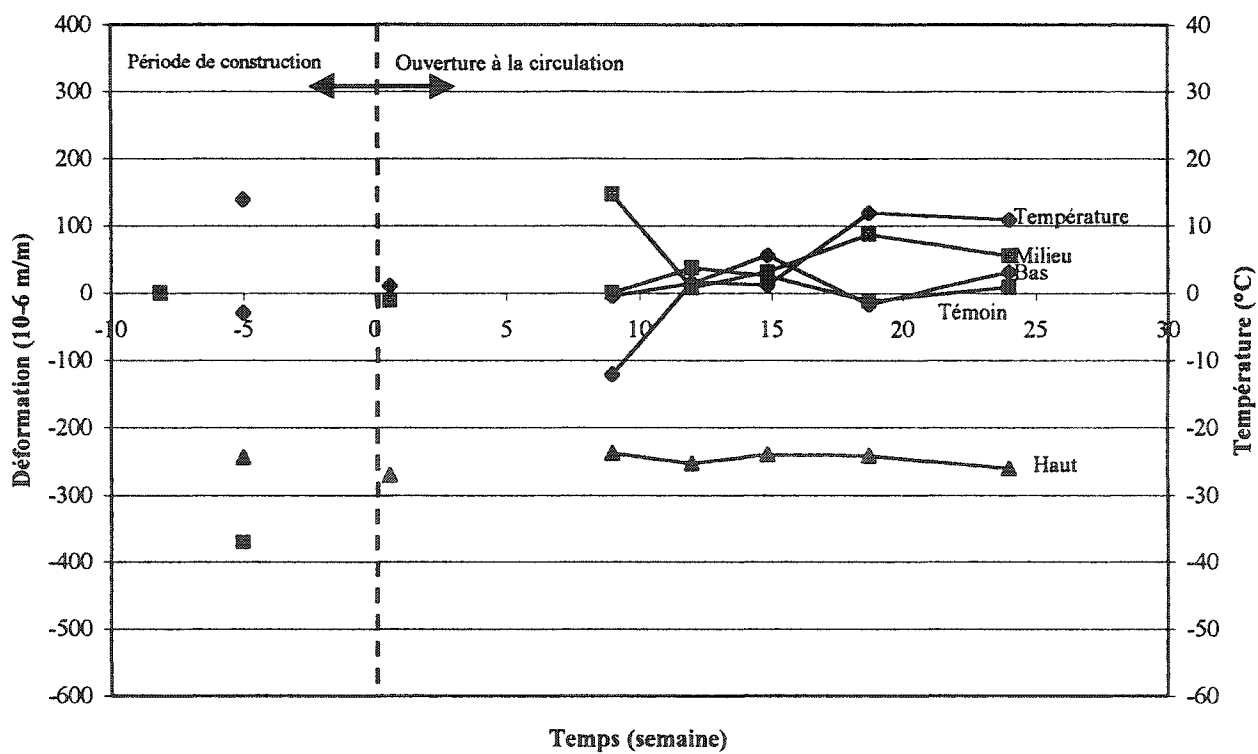


Figure B.19 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier B

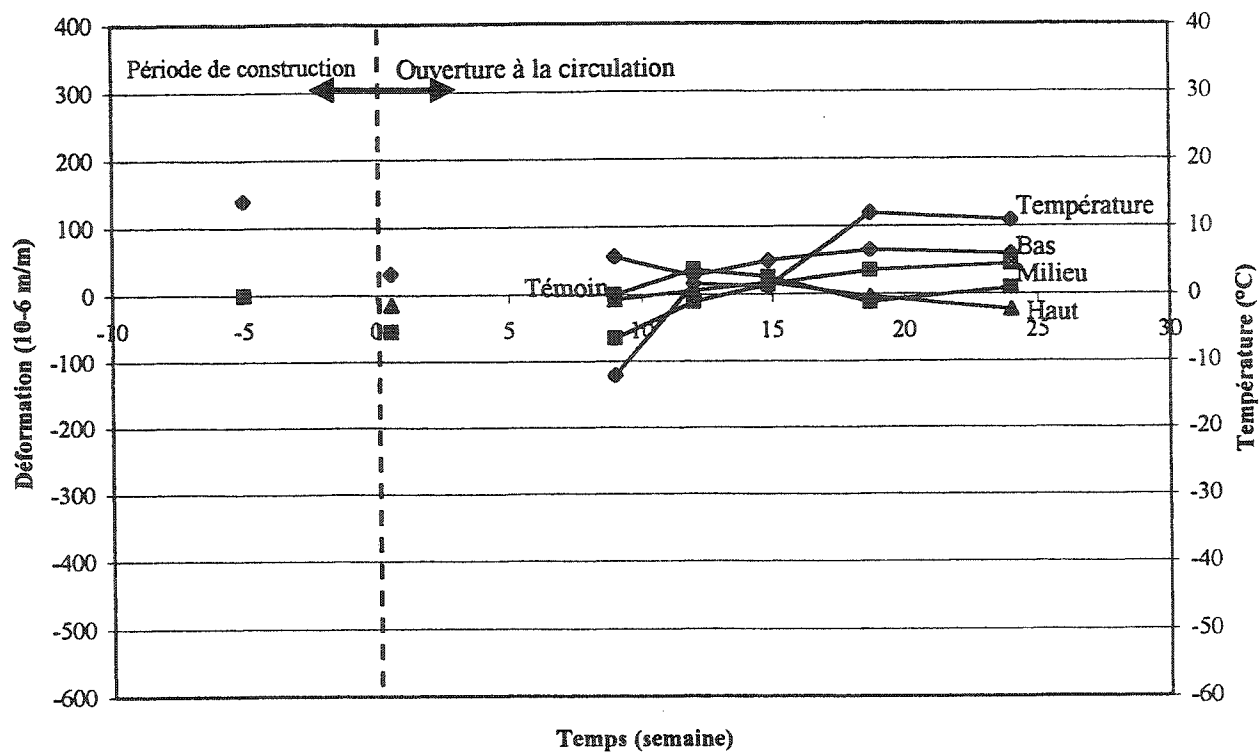


Figure B.20 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier D

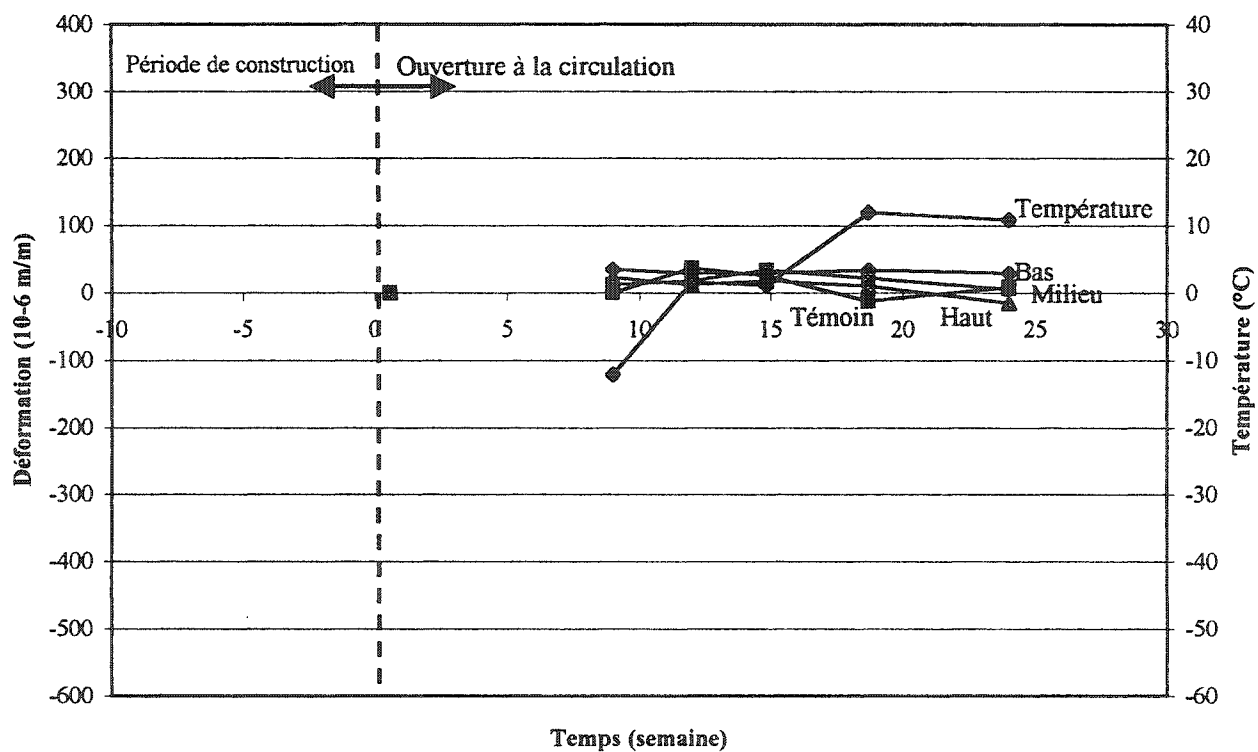


Figure B.21 Jauges électriques soudées sur la poutre d'acier E

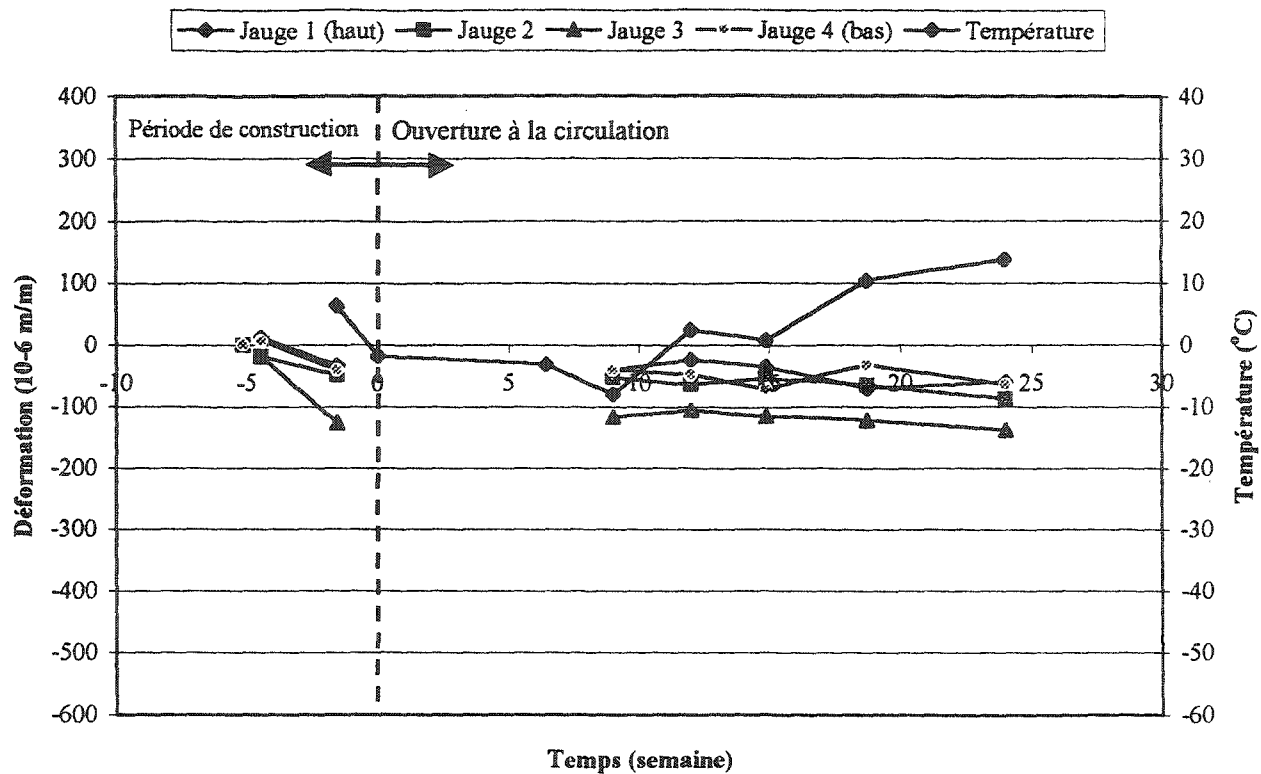


Figure B.22 Jauges électriques du bloc A

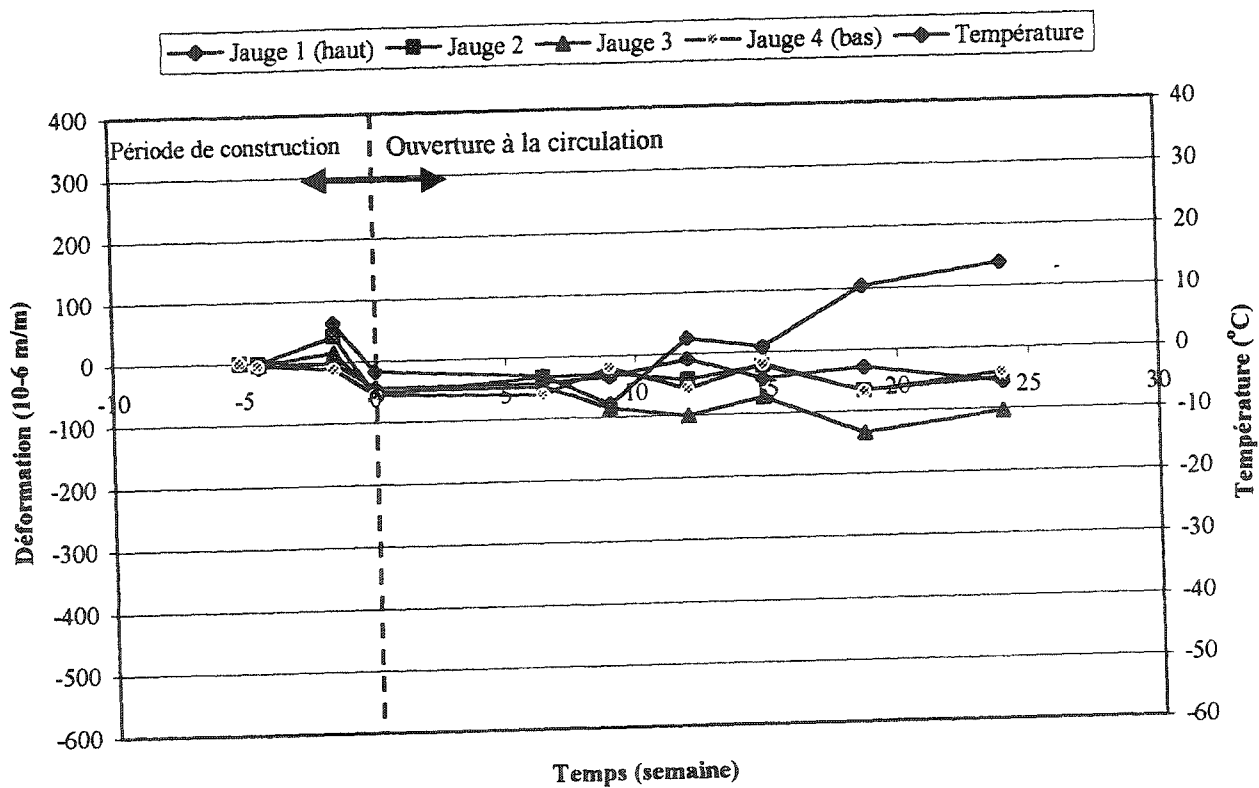


Figure B.23 Jauges électriques du bloc BA

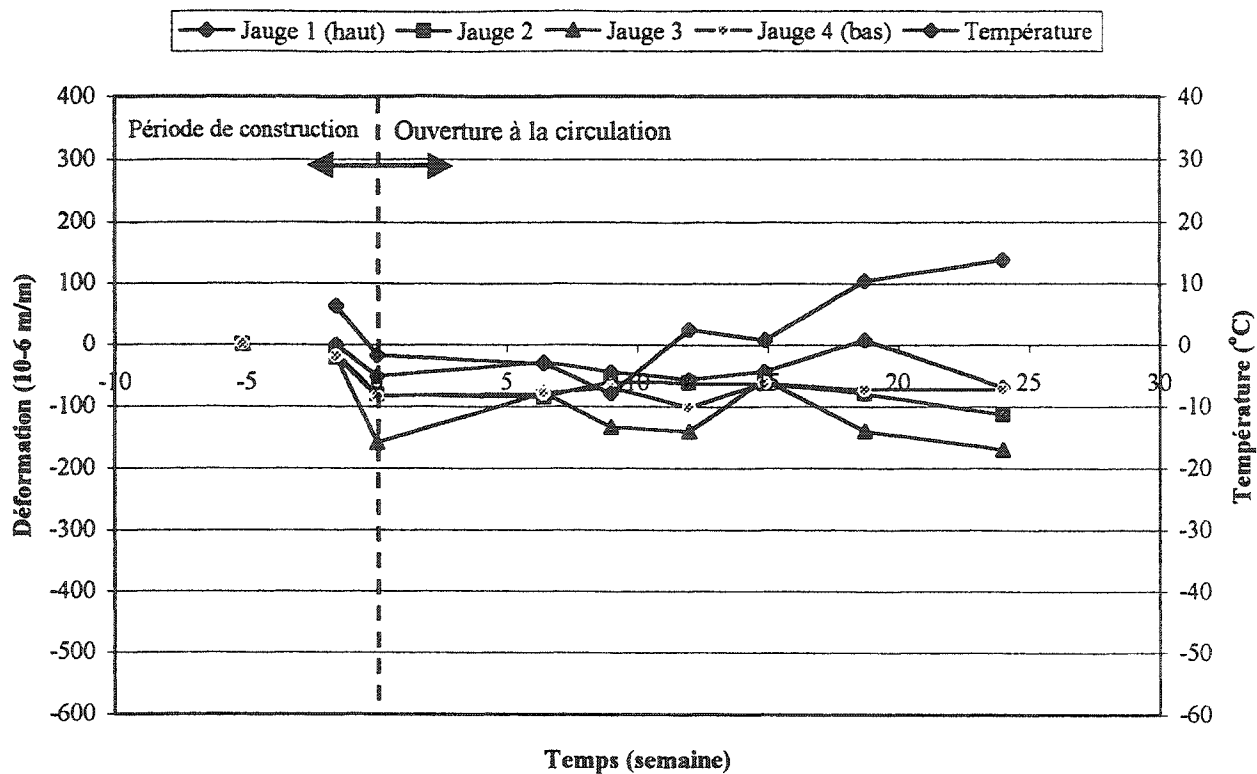


Figure B.24 Jauges électriques du bloc B

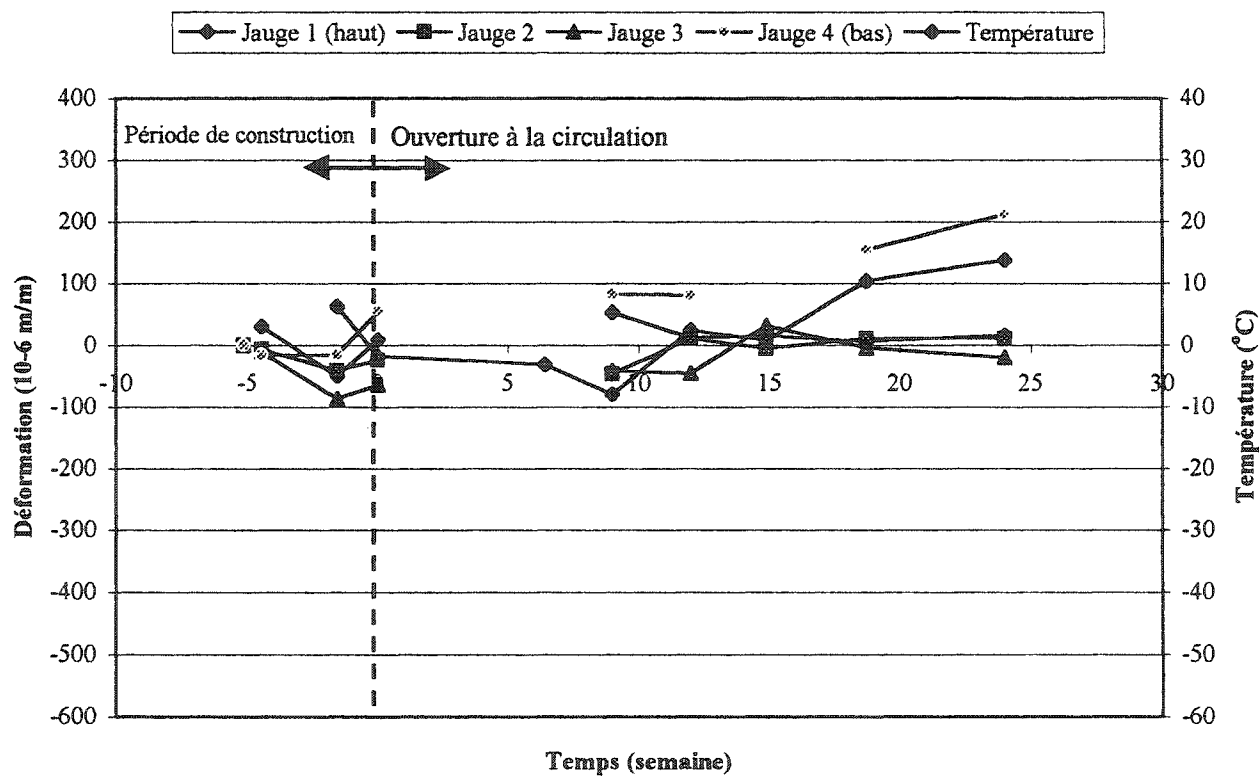


Figure B.25 Jauges électriques du bloc CB

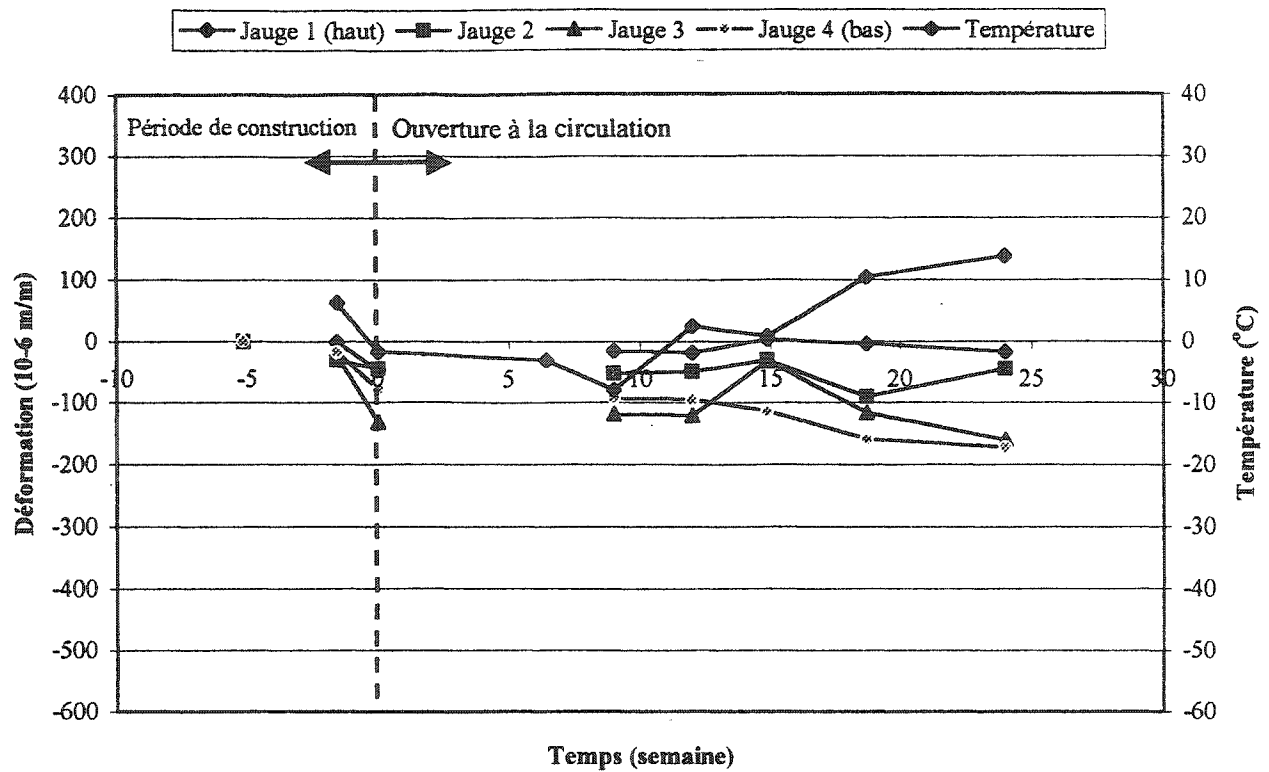


Figure B.26 Jauges électriques du bloc DC

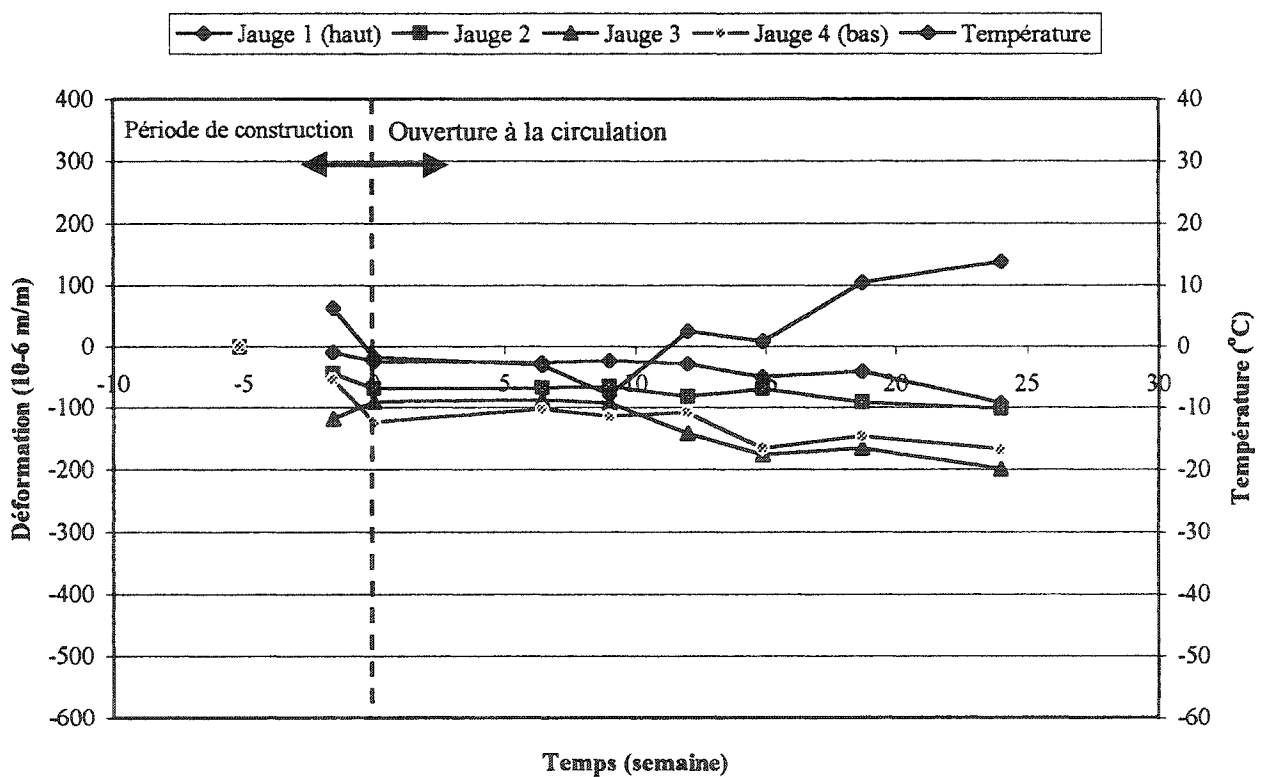


Figure B.27 Jauges électriques du bloc D

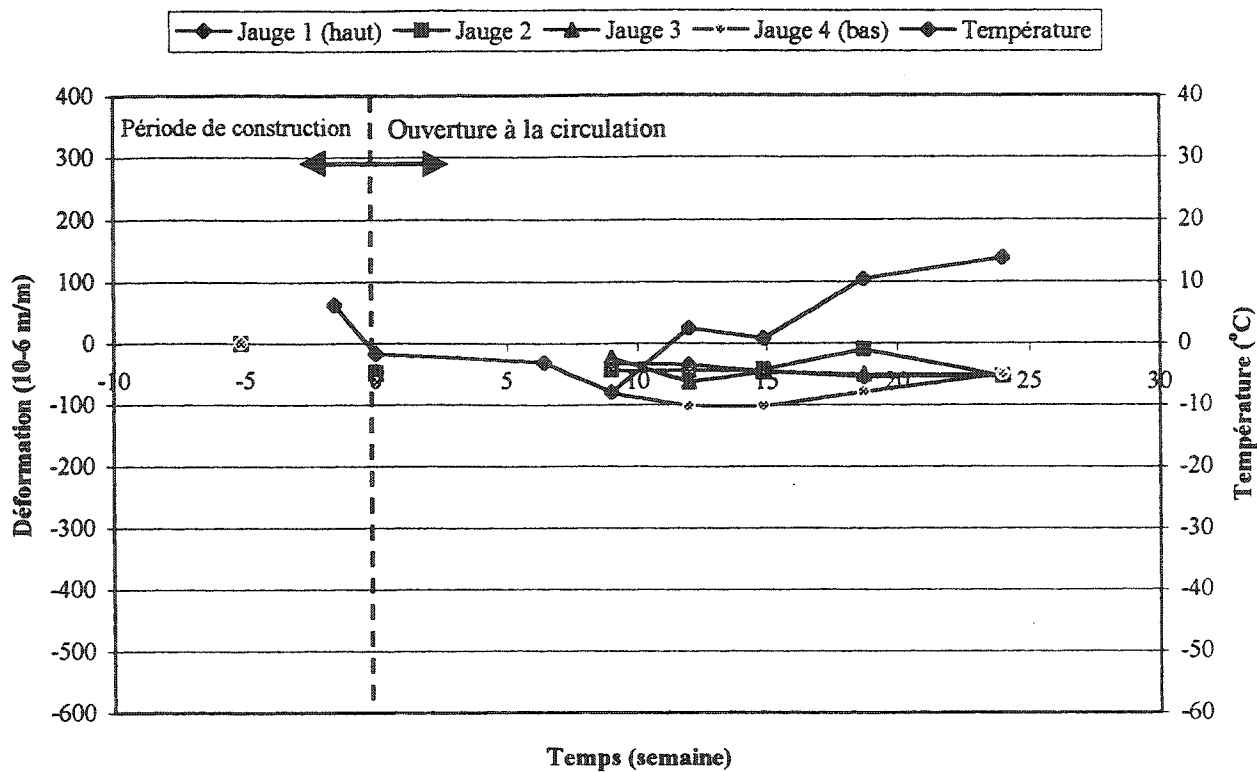


Figure B.28 Jauges électriques du bloc ED

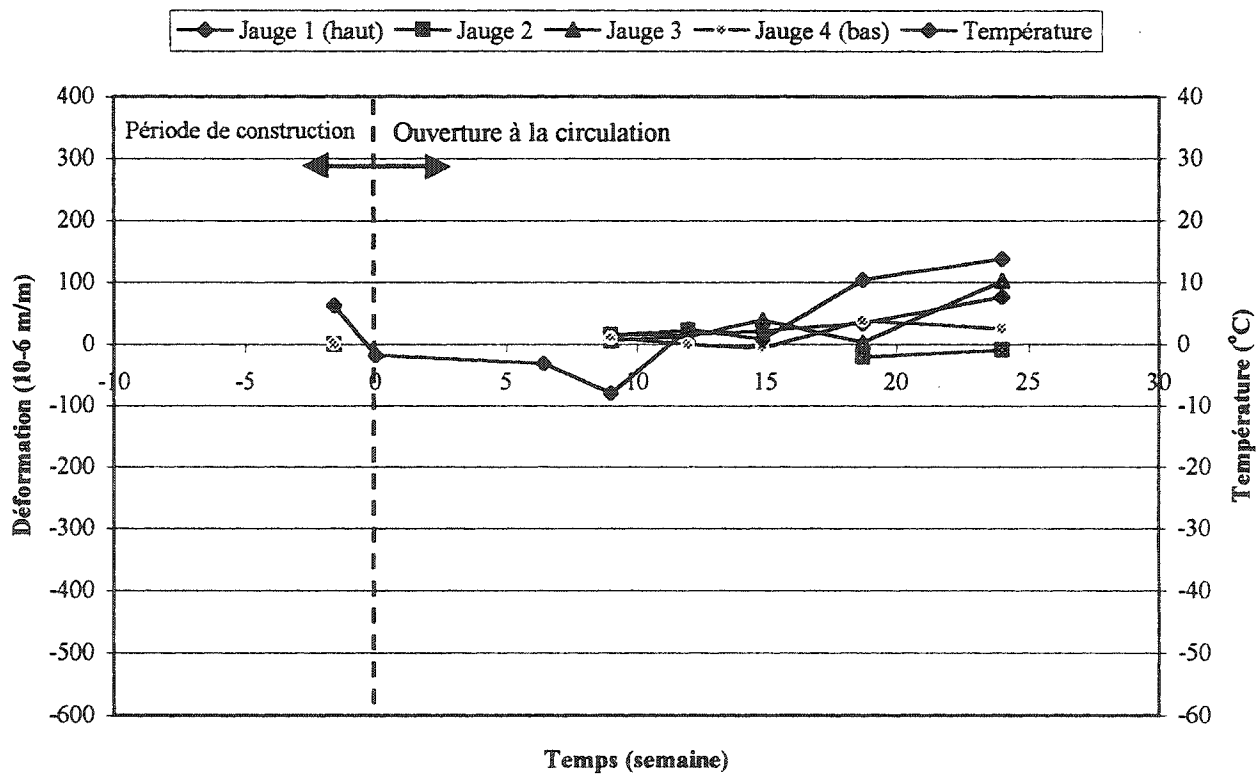


Figure B.29 Jauges électriques du bloc E